

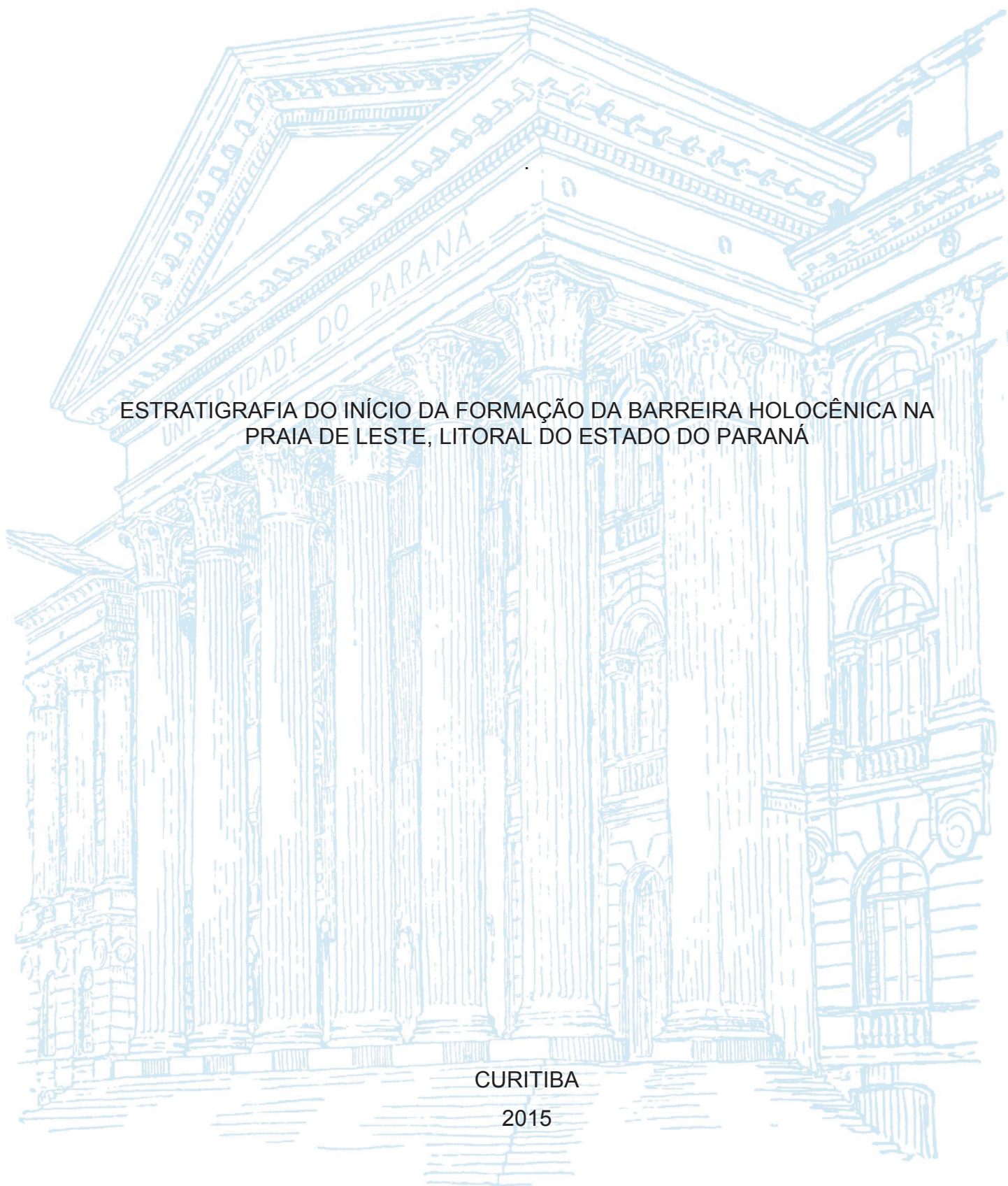
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL ANDRÉ PINHEIRO WITKOWSKI

ESTRATIGRAFIA DO INÍCIO DA FORMAÇÃO DA BARREIRA HOLOCÊNICA NA  
PRAIA DE LESTE, LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ

CURITIBA

2015



RAFAEL ANDRÉ PINHEIRO WITKOWSKI

ESTRATIGRAFIA DO INÍCIO DA FORMAÇÃO DA BARREIRA HOLOCÊNICA NA  
PRAIA DE LESTE, LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Rodolfo José Angulo

CURITIBA

2015

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

W825e

Witkowski, Rafael André Pinheiro

Estratigrafia do início da formação da barreira holocênica na praia de leste, litoral do estado do Paraná [recurso eletrônico] /Rafael André Pinheiro Witkowski. – Curitiba, 2015.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2015.

Orientadora: Maria Cristina de Souza. Coorientador: Rodolfo José Angulo.

1. Planícies. 2. Praias. 3. Costa – Proteção. 4. Geologia estratigráfica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Souza, Maria Cristina de. III. Angulo, Rodolfo José. VI. Título.

CDD: 551.7

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

## TERMO DE APROVAÇÃO

**RAFAEL ANDRÉ PINHEIRO WITKOWSKI**

*“Estratigrafia do início da formação da barreira holocênica na Praia de Leste, litoral do Paraná.”*

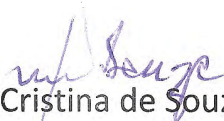
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:



Prof. Dr. Fernando Farias Vesely - UFPR



Profª. Drª. Maria Luiza Correa da Camara Rosa - UFRGS



Profª. Drª. Maria Cristina de Souza - UFPR  
Presidente

Curitiba, 09 de março de 2015.



## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Eva Alves Pinheiro por me acompanhar ao longo de todo o trabalho e me incentivar a persistir. À minha irmã Fernanda Witkowski e ao meu irmão Cesar Witkowski por entenderem a minha ausência e reclusão. A minha prima Dayane Maia, pela ajuda com o *abstract*.

Aos meus amigos Edson Iurk, Ramon Zapata e Kauê Barbosa pelas correções e comentários ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Aos meus amigos e colegas de laboratório do LECOST; Mylene Nascimento, Florença Bisi, Luiz Sielski, Clécio de Quadros e Marcelo Müller, pelas discussões e participações nas etapas da pesquisa.

A professora Dra. Maria Cristina de Souza e ao professor Dr. Rodolfo José Angulo por me conduzirem e auxiliarem nesse processo de amadurecimento científico.

Ao Laboratório de Sismoestratigrafia da UFRGS por disponibilizar o equipamento de georradar utilizado na presente pesquisa.

Ao Professor Dr. Eduardo Guimarães Barboza por realizar a aquisição de dados com o georradar, por suas aulas de processamento e pelos comentários com relação ao tema pesquisado.

Ao Professor Dr. Cristovão Vicente S. Fernandes do DHS (Departamento de Hidráulica e Saneamento) por disponibilizar o veículo para a realização da campanha de sondagem.

Ao Departamento de Geologia do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná. Ao programa de Pós-Graduação de Geologia da Universidade Federal do Paraná e a Capes pela bolsa concedida.

E por fim, ao meu amor Leticia Leal Ferreira, pelo incentivo em concluir o presente trabalho.

## RESUMO

O local pesquisado corresponde ao setor da planície costeira que marca o início da formação da barreira holocênica regressiva em Pontal do Paraná. O objetivo desse trabalho é detalhar o modelo evolutivo proposto para este setor a partir da descrição de afloramentos, testemunhos de sondagem e de dados de GPR (*Ground penetrating radar*). A interpretação dos dados de GPR permitiu estabelecer um empilhamento estratigráfico da barreira em três unidades: inferior, intermediária e superior. A unidade inferior foi caracterizada por suas radarfácies, sendo interpretada como substrato pleistocênico sobre o qual a barreira holocênica se desenvolveu. A unidade intermediária é lateralmente contínua, ocorre predominantemente a partir de 7 m até 15 m de profundidade, na ausência da unidade inferior chega a apresentar dados até 20 m. Essa unidade foi definida por suas radarfácies e fácies descritas do testemunho de sondagem, sendo constituída pelos seguintes ambientes: plataforma interna, face litorânea inferior e face litorânea média. A unidade superior é contínua e ocorre da superfície até 7 m de profundidade. Essa unidade está exposta nas margens do rio Guaraguaçu, sendo descrita em afloramentos e em dois testemunhos de sondagem. A unidade superior foi interpretada como correspondente a face litorânea superior e face praial. Foram identificadas na unidade superior estruturas com crescimento para sudoeste e para nordeste, essas feições sugerem que houve o crescimento de esporões no início da formação da barreira holocênica. Os esporões podem ter se formado sobre a plataforma interna, tendo uma associação de fácies semelhante às de uma barreira formada por cordões.

Palavras-chave: planície costeira paranaense; início da formação da barreira holocênica; crescimento de esporões.

## **ABSTRACT**

The researched place is in coastal plain which mark the beginning of regressive barrier formation at Pontal do Paraná. The objective of this study is to detail the evolution model of this sector from outcrops description, boreholes and GPR (Ground penetrating radar). The GPR data interpretation allowed establishing the barrier stratigraphic in three units: inferior, intermediary and upper. The inferior unit was characterized by its radarfacies, being interpreted by pleistocene substrate on which the holocene barrier has been developed. The intermediary unit is laterally continuous, and it occurs predominantly from 7 m to 15 m deep, in the absence of inferior unit, it can show up to 20 m. This unit was defined by radarfacies and described facies of the boreholes. The intermediary unit is formed by the following environments: innershelf, lower shoreface and middle shoreface. The upper unit is continuous and occurs from the surface up to 7 m deep. This sequence is exposed along the Guaraguaçu river, being described in outcrops into two boreholes. The upper unit was interpreted as corresponding to the uppershore face and foreshore. In the upper unit was identified growing structures to southwest and northeast. These features suggest that were growing spits at the beginning of the holocene barrier formation. These spits could have been formed over the innershelf, having a facies association similar to a barrier formed by ridges.

Key words: paranaense coastal plain; beginning of holocene barrier formation; growing spits.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo. ....	20
Figura 2– Planície costeira com cordões litorâneos, litoral centro-sul paranaense. .....	23
Figura 3- Etapas envolvidas na aquisição dos dados de georradar. O pulso é gerado (1) e emitido pela antena transmissora (2). A energia se propaga em subsuperfície até encontrar superfícies com contrastes nas propriedades elétricas (3). Estas descontinuidades provocam a reflexão da onda (4) que é captada pela antena receptora (5). Os sinais são enviados para a unidade de controle, onde são registrados, obtendo-se assim as seções GPR ou radargramas. ....	29
Figura 4 - Principais arranjos para a aquisição de dados de georradar. Na transiluminação, as antenas transmissora (T) e receptora (R) se deslocam verticalmente em subsuperfície. No <i>Common Mid Point</i> , as antenas se deslocam em sentidos opostos, modificando a relação de distância. Já no <i>Common Offset</i> , arranjo utilizado neste estudo, as antenas se deslocam no mesmo sentido, permanecendo a uma distância constante. ....	30
Figura 5- Padrões descritivos dos elementos de estratigrafia de radar. ....	33
Figura 6- Localização das linhas de GPR na área pesquisada sobreposta ao Mapa do Cenozóico de Angulo (2004). ....	36
Figura 7– (A) Antena de 200 MHz utilizada durante a aquisição de dados e (B) Console do GPR modelo SIR 3000. ....	37
Figura 8– (A) Ocupação da base do afloramento com o GPS modelo Hiper Topcon L1 L2 e (B) Tomada de posição com o GPS sobre o topo do afloramento. .....	39
Figura 09 - Localização dos afloramentos descritos na área pesquisada sobreposta ao Mapa do Cenozóico de Angulo (2004). ....	40
Figura 10- Localização das sondagens realizadas na área pesquisada sobreposta ao Mapa do Cenozóico de Angulo (2004). ....	41
Figura 11 – (A) Aquisição de posição com o GPS modelo Hiper Topcon L1 L2 do local de execução da sondagem GVT-02 e (B) Tomada de posição do local em que foi realizada a sondagem GVT-04. ....	42
Figura 12 - Execução das sondagens GVT-04 (A) e GVT-02 (B). ....	43



Figura 13 - Corte longitudinal dos testemunhos de sondagem com disco abrasivo.....	44
Figura 14 - Radarfácies Pd.....	46
Figura 15 - Radarfácies Sg, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	46
Figura 16 - Radarfácies Ot, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	47
Figura 17 - Radarfácies Ob, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	47
Figura 18 - Radarfácies Ct. ....	48
Figura 19 - Radarfácies Pt, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	48
Figura 20 - Radarfácies Cm, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	49
Figura 21 - Radarfácies Mb, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	49
Figura 22 - Radargrama e a radarfácies Oat, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	50
Figura 23 - Radarfácies Ppb, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.....	51
Figura 24 – Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies St, que indica paleocorrente com fluxo para NW. ....	53
Figura 25 – Fácies de areia com estratificação cruzada acanalada (St), plana (Sp) e de baixo ângulo (Sli) no afloramento 02. A localização do afloramento 02 pode ser observada na figura 07.....	53
Figura 26 - Fácies descritas no afloramento 02: Areia com estratificação cruzada acanalada (St), plana (Sp), baixo ângulo (Sli) e sigmóide (Ssg). ....	54
Figura 27 - Fácies areia com estratificação cruzada acanalada (St), plana (Sp) e baixo ângulo (Sli) no afloramento 02.....	55
Figura 28 - Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies Sp, que indica paleocorrente com fluxo para NW. ....	55
Figura 29 - Fácies areia com estratificação cruzada de baixo ângulo (Sli) no afloramento 01 .....	56

Figura 30 - Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies Sli, que indica paleocorrente com fluxo para NW.....	57
Figura 31 - Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies Ssg, que indica paleocorrente com fluxo para SW e NW.....	58
Figura 32 – <i>Ophiomorpha</i> sp. (A e B) identificados nos afloramentos. ....	59
Figura 33 - Estruturas de escape (e) com dimensões variando entre 2 a 10 centímetros.....	59
Figura 34 – Fácies nos testemunhos de sondagem: <b>A)</b> Fácies areia fina maciça (Sm) com tubo <i>Ophiomorpha</i> sp. (o) no GVT-01; <b>B)</b> Fácies de areia muito fina com intraclastos de argila (i) no GVT-02; <b>C)</b> Fácies de areia fina com traço de minerais pesados; <b>D)</b> Fácies de areia muito fina com traço de minerais pesados no GVT-04.....	60
Figura 35 - Fácies de lama maciça (Fm) e fácies de areia fina (Sm) no GVT-01. ....	61
Figura 36 - Fácies com interestratificação entre lama e areia fina (Hw) com <i>skolithos</i> e fácies de areia fina (Sm) no GVT-01. ....	62
Figura 37 - Fácies com areia fina com laminação plano paralela (Sh).....	63
Figura 38 - Fácies descritas no testemunho de sondagem GVT-02. Na base do testemunho há predominância de lâminas com granulação média a grossa intercalada com níveis de areia fina (A). Em direção ao topo (B), (C) e (D) há gradativamente o aumento de lâminas com areia fina em relação aos níveis de areia média a grossa. No topo da sondagem (E) foram descritas as fácies Sr e Sm, as quais são compostas essencialmente por areia fina. ....	64
Figura 39 - Fácies de areia média a grossa com estrutura cruzada plana. ....	65
Figura 40 - Perfil de GPR na barreira holocênica regressiva em Praia de Leste. ....	66
Figura 41 - Localização da seção guaragu001 NE-SO 2270 – 2370 (em azul) na área de pesquisa.....	68
Figura 42 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem nas unidades inferior, intermediária e superior. ....	69
Figura 43 - Localização da seção guaragu001 NE-SO 1600 – 1700 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-01 na área de pesquisa. ....	71
Figura 44 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem nas unidades inferior, intermediária e superior. ....	73

Figura 45 – Correlação da radarfácies Pt com a fácies Sm do testemunho de sondagem GVT-01 na seção de radar (1600 – 1700).....	74
Figura 46 – Correlação das fácies Hw e Fm do GVT-01 com a seção de radar (1600 – 1700).....	75
Figura 47 – Correlação das fácies do GVT-01 com o padrão Mb da seção de radar (1600 – 1700).....	76
Figura 48 – Localização da seção guaragu002 NO-SE_NE-SO 1540 – 1650 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-01 na área de pesquisa .....	78
Figura 49 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem da seção de radar 1540 – 1650. A barra em vermelho indica a mudança de sentido de levantamento, o qual inicia de NO-SE, passando para NE-SO.	79
Figura 50 - Localização da seção guaragu001 NE-SO 2050 – 2150 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-02 na área de pesquisa. ....	80
Figura 51 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem da seção de radar_NE_SO 2050 - 2150 .....	81
Figura 52 - Correlação das fácies do GVT-02 com o padrão Ppb da seção de radar (2050 – 2150).....	82
Figura 53 - Localização da seção guaragu003 NE-SO 10 – 110 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-04 na área de pesquisa. ....	83
Figura 54 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem da seção de radar_NE_SO 10 – 110. ....	84
Figura 55 - Correlação das fácies do GVT-04 com o padrão Ppb da seção de radar (10 – 110).....	85
Figura 56 – Foto aérea de 1970 escala 1:70.000 da planície centro-sul paranaense, mostrando as feições recurvadas para sudoeste e para nordeste (Souza 2005).....	86
Figura 57 – Esporão arenoso do Ararapira com sua extremidade arqueada fotointerpretada. Imagem de satélite: <i>Google Earth</i> ® 2013. ....	88
Figura 58 - Distribuição dos perfis dos afloramentos e das sondagens com vibrotestemunhador, com a profundidade e a paleopropfundidade das associações de fácies da barreira holocênica do setor estudado .....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Descrição das siglas utilizadas para a caracterização das superfícies de 2° ordem.....	38
Tabela 2– Afloramentos descritos e dados obtidos durante o levantamento de campo .....	40
Tabela 3 - Sondagens executadas.....	42
Tabela 4- Fácies identificadas nos afloramentos da barreira holocênica. ....	52
Tabela 05 - Fácies identificadas nos testemunhos de sondagem da barreira holocênica. ....	59

## **LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS**

ACAS - Água Central do Atlântico Sul

DGPS – Differential Global Positioning System

GNSS - Global Navigation Satellite Systems

GPS - Sistema de Posicionamento Global

GPR - Ground penetrating radar

GSSI – Guaraguaçu Vibrotestemunhagem

GVT - Guaraguaçu Vibrotestemunhagem

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NRM - Nível Relativo do Mar

UFPR - Universidade Federal do Paraná

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

UTM - Universal Transversa de Mercator

SAD - South American Datum



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	18
1.1 OBJETIVO .....	18
1.1.1. Objetivos Específicos .....	19
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	19
1.3 CLIMA.....	21
1.4 OCEANOGRAFIA.....	21
2. CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO .....	23
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
3.1 FÁCIES.....	25
3.2 ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES .....	25
3.3 SISTEMA COSTEIRO .....	26
3.3.1 Barreiras costeiras dominadas por ondas .....	26
3.4.2 Barreiras transgressivas.....	26
3.4.3 Barreiras regressivas .....	27
3.4.4 Barreiras estacionárias.....	27
3.4.5 Esporões .....	27
3.4.6 Canais de maré .....	28
3.5 <i>GROUND PENETRATING RADAR</i> (GPR).....	28
3.5.1 Critérios de interpretação das radarfácies.....	31
3.5.2 Tipos de terminações das radarfácies.....	32
3.5.2.1 Truncamento erosivo .....	33
3.5.2.2 Terminações com o limite inferior .....	33
3.5.2.3 Terminações com o limite superior .....	34
3.5.2.4 Terminações não sistemáticas: <i>Offlap</i> , Convergência Interna e Truncamentos Aparentes. ....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO .....	35
4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO GPR .....	35
4.2.1 Aquisição.....	36
4.2.2 Processamento .....	37
4.2.3 Interpretação .....	38
4.3 DESCRIÇÃO DE AFLORAMENTOS .....	39
4.4 VIBROTESTEMUNHAGEM.....	41
4.4.1 Programação de Sondagens.....	41
4.4.2 Execução das sondagens .....	43

4.4.3 Descrição dos testemunhos .....	43
5. RESULTADOS .....	45
5.1 SUPERFÍCIES LIMITANTES DE PRIMEIRA ORDEM .....	45
5.2 SUPERFÍCIES LIMITANTES DE SEGUNDA ORDEM .....	45
5.2.1 Radarfácies Pd .....	46
5.2.2 Radarfácies Sg .....	46
5.2.3 Radarfácies Ot .....	46
5.2.4 Radarfácies Ob .....	47
5.2.5 Radarfácies Ct .....	47
5.2.6 Radarfácies Pt .....	48
5.2.7 Radarfácies Cm .....	49
5.2.8 Radarfácies Mb .....	49
5.2.9 Radarfácies Oat .....	50
5.2.10 Radarfácies Ppb .....	50
5.3 FÁCIES SEDIMENTARES NOS AFLORAMENTOS .....	52
5.3.1 Areia com estratificação cruzada acanalada (Fácies St) .....	52
5.3.2 Areia com estratificação cruzada plana (Fácies Sp) .....	54
5.3.3 Areia com estratificação cruzada de baixo ângulo (Fácies Sli) .....	56
5.3.4 Areia com estratificação cruzada sigmóide (Fácies Ssg) .....	57
5.4 ICNOFÓSSEIS .....	58
5.5 FÁCIES DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM .....	59
5.5.1 Areia maciça (Fácies Sm) .....	60
5.5.2 Lama maciça (Fácies Fm) .....	61
5.5.3 Heterolítica ondulada (Fácies Hw) .....	61
5.5.4 Areia com laminação plano paralela (Fácies Sh) .....	62
5.5.5 Areia com ondulações e laminações cruzadas (Fácies Sr) .....	64
5.5.6 Areia com estratificação cruzada plana (Fácies Sp) .....	64
6. DISCUSSÃO .....	66
6.1 ESTRATIGRAFIA DA ÁREA DE ESTUDO .....	66
6.1.1 Unidade inferior .....	66
6.1.2 Unidade intermediária .....	69
6.1.3 Unidade superior .....	75
i) Deriva longitudinal para sudoeste .....	85
ii) Bloqueio do sentido de deriva longitudinal predominante .....	87
6.2 INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL .....	89
6.2.1 Face litorânea inferior .....	92
6.2.2 Face litorânea média .....	92

6.2.3 Face litorânea superior.....	92
6.2.4 Face praial/Paleocanal.....	93
7. CONCLUSÃO.....	94
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	95
REFERÊNCIAS.....	96

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de barreiras holocênicas está relacionado com a queda do nível relativo do mar (NRM), evidenciadas pela associação de fácies, e interpretação paleoambiental com o auxílio de datações C14, apresentadas por Souza (2005). A barreira holocênica teria se formado após o máximo NRM entre 7.000 e 5.000 anos antes do presente (Angulo *et al.*, 2009). Souza (2005) sugere pela descrição e associação de fácies nas proximidades de Praia de Leste, uma unidade regressiva para a barreira holocênica paranaense. Segundo Lessa *et al.* (2000), na planície costeira paranaense e na planície norte catarinense, a partir da extensão e disposição da formação das barreiras holocênicas em relação aos estuários, são comuns evidências de significativo componente de deriva longitudinal com direção sul-norte. De acordo com Souza (2005), nessas planícies são observadas feições lineares correspondentes a antigos cordões litorâneos, com alinhamento NE, que indicam a direção preferencial da paleocosta. Ainda de acordo com Souza (2005) no litoral paranaense foram observadas feições em fotos aéreas e em perfil de GPR (*Ground penetrating radar*), que indicariam direção de migração ocorre para SW. Essas feições foram interpretadas como esporões, que podem ter crescido após o máximo nível do mar (7.000 e 5.000 anos A.P.) e, seriam resultantes de períodos de inversão do sentido da deriva longitudinal.

Na presente dissertação foi estudado o setor da barreira holocênica que apresentou feições de inversões no estágio inicial de sua formação, sendo descritas suas porções expostas em afloramentos e em testemunhos, e caracterizada sua arquitetura deposicional através da interpretação do imageamento da subsuperfície realizado pelo georradar.

### 1.1 OBJETIVO

A presente dissertação tem como objetivo detalhar o modelo evolutivo proposto por Souza (2005) para o início da deposição da barreira holocênica de Praia de Leste através de sua estratigrafia.

De acordo com Souza (2005), a barreira holocênica, entre 7.000 e 5.000 anos A.P. durante o máximo nível do mar de  $3,5 \pm 1,0$  m (Angulo *et al.*, 2006),

teria esporões com crescimento para sudoeste quando a queda foi mais acelerada, até aproximadamente 4.000 anos A.P. Posteriormente haveria ocorrido a progradação com o crescimento de esporões para nordeste, de 4.000 a 2.500 anos A.P., intervalo em que o nível relativo do mar estava mais estável. Por fim, após 2.500 anos A.P. houve a formação de cordões regressivos.

O entendimento dos processos que ocorreram no início da formação da barreira holocênica, é relevante para a discussão da evolução da planície costeira paranaense durante o Quaternário.

#### 1.1.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

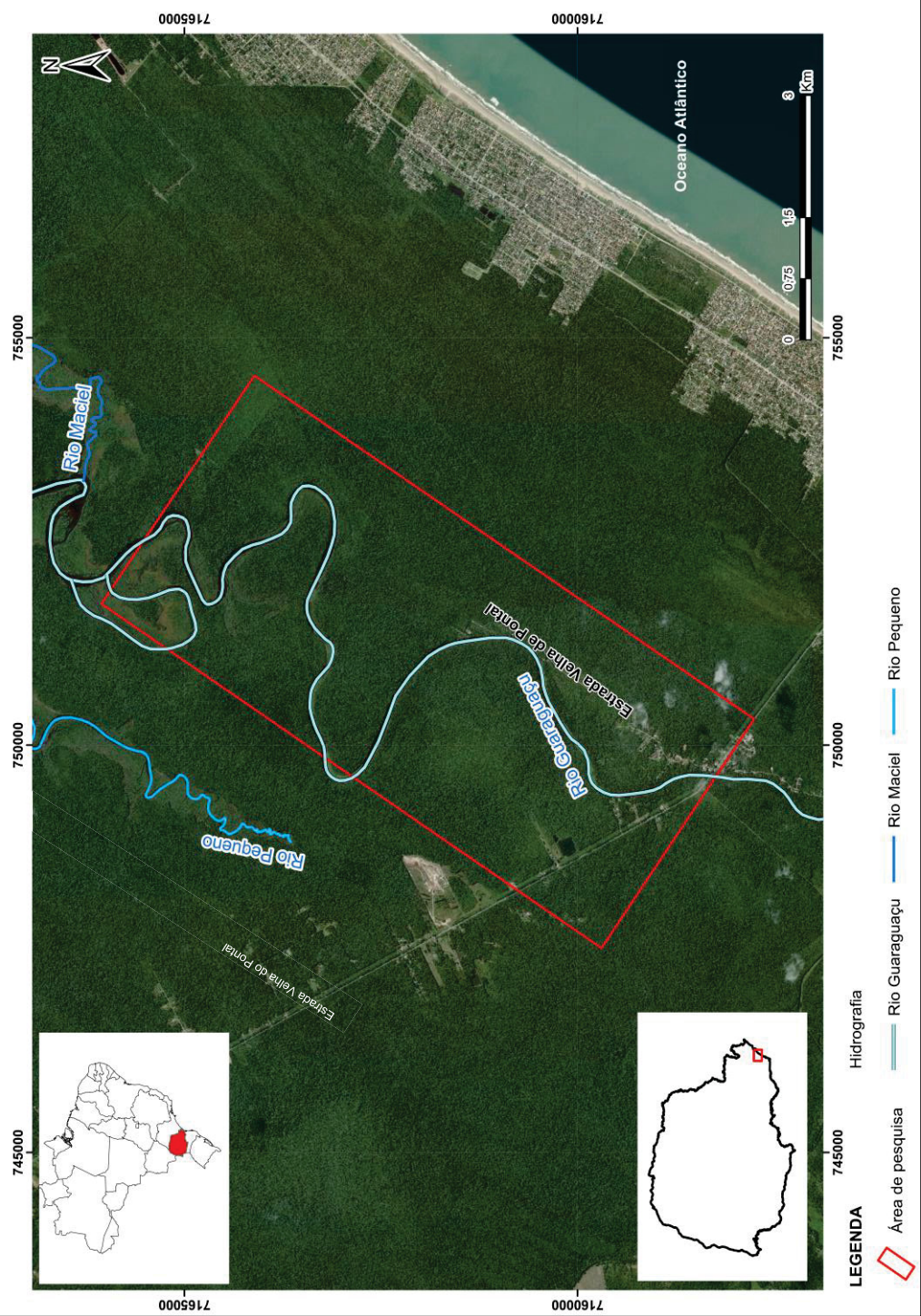
- i) Definição da estratigrafia de radar através das radarfácies;
- ii) Caracterização das fácies sedimentares;
- iii) Definição do modelo deposicional no início da formação da barreira holocênica.

### 1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no município de Pontal do Paraná no litoral do Estado do Paraná (Figura 1). O estudo realizado restringe-se a Estrada Velha de Pontal do Paraná, onde foram realizados os levantamentos de GPR, sondagens e descrição de afloramentos nas margens do Rio Guaraguaçu.



Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: O Autor, 2015; IBGE, 2015.

### 1.3 CLIMA

O litoral do Estado do Paraná, onde se situa a área estudada, pertence à zona climática subtropical, com clima regional subtropical úmido, sendo classificado como Cfa de acordo com a classificação de Köeppen (Peel *et al.* 2007).

A temperatura média anual é de 21,5 ° C, e a precipitação média anual é de 2500 mm (IPARDES 1995). Segundo Angulo *et al.* (2009) o sentido predominante dos ventos é de sul/sudeste durante a primavera e verão, soprando com velocidades superiores a seis m/s.

### 1.4 OCEANOGRAFIA

A costa paranaense é recortada pelo complexo estuarino da Baía de Paranaguá e ao sul pela Baía de Guaratuba, ambas originadas por ingressão marinha (Bigarella *et al.* 1978).

O litoral do Paraná é atingido por ondas do leste e do sul, cujo período máximo é de cerca de 16 segundos, com uma altura máxima sazonal de onda variando entre 4,0 e 6,4 m. As maiores ondulações ocorrem mais frequentemente durante os meses de outono e inverno, e estão relacionadas com a passagem das frentes frias (Pianca *et al.* 2010).

Os ventos no litoral paranaense são definidos pelo anticiclone do Atlântico Sul e pelo anticiclone migratório polar na sua ação sobre o ramo atlântico da massa polar (Bigarella *et al.* 1978). Marone *et al.* (1995), baseando-se no deslocamento de garrafas de deriva ao longo da costa concluíram que o fluxo principal das correntes de deriva litorânea na região ocorre no sentido norte.

De acordo com Marone & Jamiyanaa (1997) a maré é semidiurna, e em mar aberto apresenta amplitudes médias de 1,4 m, enquanto no interior do Estuário de Paranaguá é de 1,7 m. Segundo Marone *et al.* (1995) as marés meteorológicas ocorrem com magnitudes que frequentemente atingem 80 cm.

As variações sazonais de temperatura e salinidade da água na plataforma interna do estado do Paraná são controladas por três fatores físicos principais: intrusões laterais de águas subantárticas (Frente Subtropical) no inverno, intrusões de fundo da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na

primavera e drenagem continental no verão (Brandini *et al.* 1990, Mahiques *et al.* 1999).

A linha de costa paranaense tem extensão de aproximadamente 126 km, e as praias são classificadas com base na sua dinâmica em oceânicas, oceânicas sob influência das desembocaduras estuarinas (Angulo 1993, Angulo 2004).

As praias são constituídas por areias finas a médias, bem selecionadas, compostas por quartzo, e com teores variáveis de fragmentos carbonáticos biodetríticos e minerais pesados (Ângulo, 2004). São praias intermediárias com inclinações de 1 ° a 5 ° e pelo menos duas barras na zona de arrebentação. A alta energia das ondas causam variações significativas no perfil da praia ao longo do tempo (Quadros, 2002). Em toda costa há uma série de cristas de dunas frontais, que apresentam de 3 a 5 m de altura e são compostas de areia fina bem selecionada (Ângulo, 2004).

Veiga *et al.* (2006) identificaram na antepraia e plataforma interna cinco fácies texturais diferentes entre a zona de arrebentação e a profundidade de 15m: (a) areia fina a muito fina relacionada com o refluxo do delta de maré de Paranaguá; (b) areia fina a muito fina na zona de arrebentação; (c) areia fina, com 10 a 40% de lama entre 5 e 10 m de profundidade; (d) areia grossa entre 10 e 14 m de profundidade, e (e) na plataforma interna, areias finas em 10 a 15 m de profundidade.

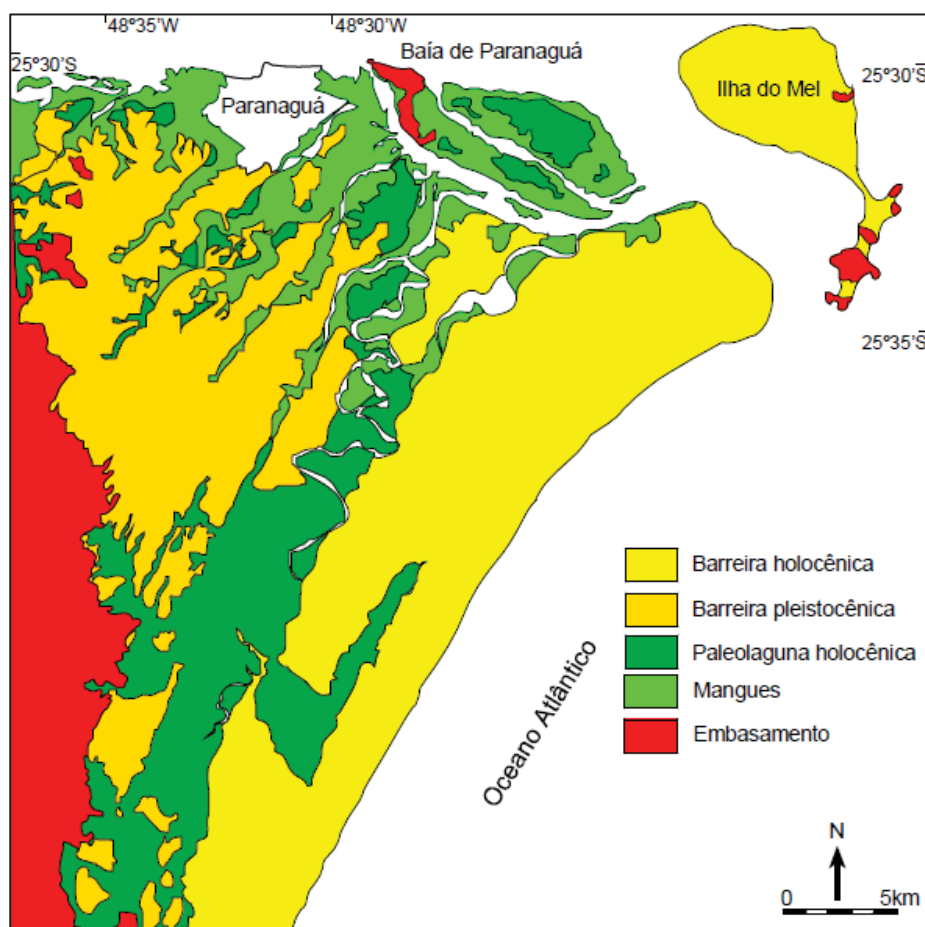
## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO DO ESTUDO

A planície costeira do estado do Paraná foi estudada primeiramente por Bigarella (1946), que discutiu a evolução geomorfológica da planície e a classificou de acordo com o tipo de sedimentação (marinha, intermediária e terrígena).

O primeiro trabalho de investigação direta de subsuperfície foi realizado por Maack (1947), que descreveu os sedimentos amostrados através de uma sondagem geotécnica realizada em Praia de Leste. A sondagem perfurou 101 m de sedimentos, atingindo o embasamento cristalino.

De acordo com o mapeamento de Angulo (2004), a cobertura sedimentar cenozoica pode ser subdividida em dois tipos principais: continentais e costeiros, sendo a planície costeira paranaense uma planície com cordões litorâneos do Holoceno e do Pleistoceno (Figura 2).

Figura 2– Planície costeira com cordões litorâneos, litoral centro-sul paranaense.



Fonte: Souza, 2005.

Lessa *et al.* (2000) utilizando dados de sondagens realizadas nas barreiras paranaenses por empresas de geotecnia e publicados por Maack (1947) e Bigarella *et al.* (1978), além de novos testemunhos obtidos com o vibrotestemunhador em conjunto com descrição de afloramentos, definiram a barreira como regressiva e identificaram a existência de uma barreira holocênica transgressiva.

De acordo com Lessa *et al.* (2000), a barreira transgressiva teria migrado sobre os sedimentos paleoestuarinos durante a última subida do nível do mar, sendo possivelmente erodida pelo rio Guaraguaçu.

Souza (2005) definiu seis ambientes deposicionais através da descrição de fácies e suas associações: plataforma interna; face litorânea inferior; face litorânea média; face litorânea superior; praia subaérea e intermaré.

Através da determinação dos ambientes deposicionais Souza (2005) definiu a sequência regressiva da barreira que progradiu sobre a superfície de erosão elaborada sobre os depósitos pleistocênicos. Entretanto, não encontrou sedimentos paleolagunares holocênicos sob os sedimentos da barreira regressiva, tampouco as fácies da barreira transgressiva, o que difere do modelo proposto por Lessa *et al.* (2000).



### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 FÁCIES**

O termo fácies foi definido de diversas formas por diferentes autores. Segundo Walker (1992) a definição mais aceita foi elaborada por Middleton (1978), o qual sucintamente definiu fácies como todos os aspectos da rocha, e ainda afirmou que a chave para a interpretação das fácies é a combinação de observações feitas sobre suas relações espaciais e características internas, com informações de outras unidades estratigráficas já estudadas, e também a partir de ambientes sedimentares modernos.

Segundo Dalrymple (2010) a subdivisão das fácies deve ser baseada em uma descrição cuidadosa dos depósitos sedimentares, sendo distinguidas com base em seus atributos genéticos como o tamanho do grão, grau de seleção, estruturas físicas, conteúdo fóssilífero e composição dos minerais antigênicos sindeposicionais. A maior parte dos estudos define as fácies avaliando qualitativamente combinações de diferentes estruturas sedimentares e orgânicas, em afloramentos e testemunhos.

De acordo com Dalrymple (2010), as fácies podem ser definidas em diferentes escalas, tanto em uma camada individual quanto em uma unidade litoestratigráfica. A escala é definida pelo objetivo do estudo.

#### **3.2 ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES**

As fácies definidas descritivamente em campo ou em testemunho podem, inicialmente, não sugerir um ambiente particular. A chave para a interpretação é analisar as fácies em conjunto e dentro de um contexto, assim obtêm-se informações importantes que as fácies consideradas individualmente podem não oferecer (Dalrymple 2010).

### 3.3 SISTEMA COSTEIRO

#### 3.3.1 Barreiras costeiras dominadas por ondas

As barreiras costeiras são os elementos deposicionais mais importantes das costas dominadas por ondas. Esses elementos ocorrem nas bordas das costas, onde a topografia é geralmente suave e os sedimentos são abundantes (Dillenburg & Hesp, 2009). São formadas paralelamente à costa, pela acumulação de areia, cascalho, conchas e matéria orgânica, devido à ação de ondas, marés e ventos (Dillenburg & Hesp, 2009).

Os principais fatores que determinam as características das barreiras costeiras são: comportamento do nível do mar, morfologia do substrato, disponibilidade de sedimentos, ondas, marés e ventos (Hesp & Short, 1999).

As barreiras são resultados de transporte e mobilização de sedimento, com crescimento transversal à costa (Field & Duane 1976, Oertel *et al.* 1992), em movimento de translação. Desta forma, o embasamento continental define a topografia antecedente, constituindo o substrato comum sobre o qual as barreiras se depositam.

As barreiras podem exibir morfologia e estratigrafia variada longitudinalmente e em corte, e também possuem diferentes relações físicas com o continente (Kraft & Chazastowski, 1985). De acordo com (Roy *et al.*, 1994) os modelos de fácies para barreiras costeiras devem considerar três situações distintas: sistemas de barreiras transgressivas, estacionárias e regressivas.

#### 3.4.2 Barreiras transgressivas

A estratigrafia transgressiva resulta na migração da barreira em direção ao continente devido ao aumento do nível do mar, ou devido ao balanço negativo da taxa de sedimentação, sob uma situação de mar estável ou quase estável (Galloway & Hobday 1983).

No sistema de barreiras transgressivas geralmente há a presença de uma laguna, estuário ou pântano entre o corpo de areia e o continente, sendo que a conexão entre o mar e este corpo aquoso é feita por canais de maré que galgam ou cortam as ilhas-barreira (Oertel 1985). Segundo Roy *et al.* (1994) a translação da barreira em direção ao continente é determinada pela inclinação

do substrato, o balanço de sedimentos e o espaço de acomodação. No caso mais simples, segundo, por exemplo, os autores Hayes (1994), Ritchie & Penland (1990), com o mínimo de sedimento envolvido o perfil da costa será composto pela praia, possivelmente, dunas frontais pequenas e lateralmente descontínuas, dunas do tipo *nebkha* dispersas e leques de sobrelavagem.

#### 3.4.3 Barreiras regressivas

As barreiras regressivas são caracterizadas por uma série de praias e cordões litorâneos alinhados com a linha de costa, podendo também ser formados esporões. O nível do mar estacionário ou levemente em ascensão reflete o balanço positivo de sedimentos ao longo da costa, sendo que em uma progradação sob um regime de regressão forçada, pode haver a contribuição de sedimentos retrabalhados da plataforma continental.

Roy *et al.* (1994) propõe a utilização de barreira regressiva restrita a feições depositadas por ondas sob queda do nível do mar, em uma regressão forçada, formando as planícies costeiras com cordões litorâneos.

Os modelos clássicos de sequências regressivas clásticas dominadas por ondas podem ainda ser classificadas em dois tipos: os de costas de alta e os de baixa energia de ondas (Reading & Collinson 1996).

#### 3.4.4 Barreiras estacionárias

De acordo com Roy *et al.* (1994), seguindo a desaceleração de subida do nível do mar em associação com um balanço positivo de sedimentos pode levar a estabilização da barreira.

#### 3.4.5 Esporões

Esporões são corpos arenosos que ocorrem ao longo das costas modernas, devido à acreção por transporte longitudinal (Nielsen & Johannessen 2008, 2009). Sua morfologia depende de correntes, ondas, ventos, clima, balanço sedimentar e amplitudes de maré.

Os esporões são dinâmicos em sua posição e forma, sua migração ocorre em resposta a flutuações eustáticas e a eventos extremos, como as tempestades. São mais frequentes em águas costeiras rasas, onde grandes volumes de areia estão disponíveis (Schwartz 1982).

O principal mecanismo para o desenvolvimento do esporão é a acresção pelo transporte de sedimentos por correntes de deriva (Petersen *et al.* 2008).

#### 3.4.6 Canais de maré

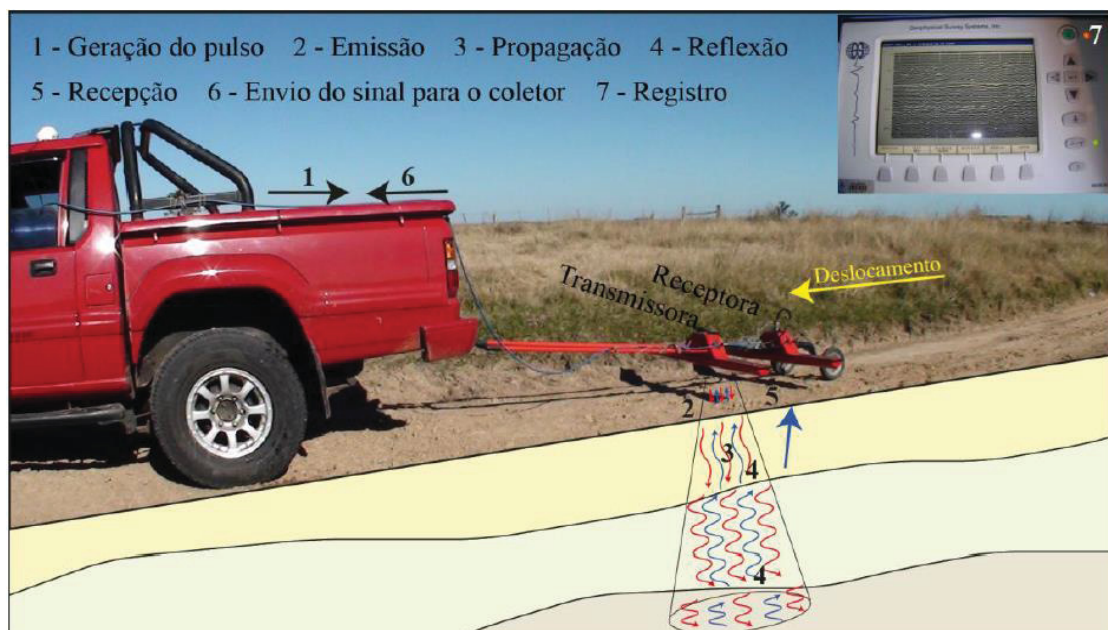
Os canais de maré podem surgir naturalmente através da energia da maré, por meio de tempestades ou a partir de uma intervenção antrópica. Os canais seccionam as barreiras arenosas e promovem a ligação do corpo hídrico à retaguarda (lagunas, baías, entre outros) com o ambiente marinho, bem como a troca de água entre eles. O fluxo de maré é causado pela diferença de nível d'água entre o mar e a baía, apresentando maior velocidade dentro do canal de maré e decaindo ao se distanciar deste, o que influencia diretamente na granulometria dos sedimentos depositados, que diminui na medida em que se afasta do canal (Dean & Dalrymple 2004).

#### 3.5 GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

O método *Ground Penetrating Radar* ou georradar é uma técnica geofísica não invasiva que detecta discontinuidades eletromagnéticas dos materiais presentes na subsuperfície. O método é baseado na geração, transmissão, propagação, reflexão e recepção de pulsos eletromagnéticos no subsolo, operando na faixa de frequência de rádio e microondas que pode variar desde MHz até GHz (Neal 2004).

A transmissão é realizada por meio de uma antena posicionada na superfície do terreno ou suspensa (Figura 3). A onda eletromagnética emitida se propaga até atingir um horizonte com contraste nas propriedades elétricas, o que culmina em sua reflexão (Davis & Annan 1989). O contraste é dado pela variação no conteúdo em água, associado ao litotipo ou ao solo, granulometria, porosidade e compactação (Jol & Bristow 2003).

Figura 3- Etapas envolvidas na aquisição dos dados de georradar. O pulso é gerado (1) e emitido pela antena transmissora (2). A energia se propaga em subsuperfície até encontrar superfícies com contrastes nas propriedades elétricas (3). Estas descontinuidades provocam a reflexão da onda (4) que é captada pela antena receptora (5). Os sinais são enviados para a unidade de controle, onde são registrados, obtendo-se assim as seções GPR ou radargramas.



Fonte: Rosa, 2012.

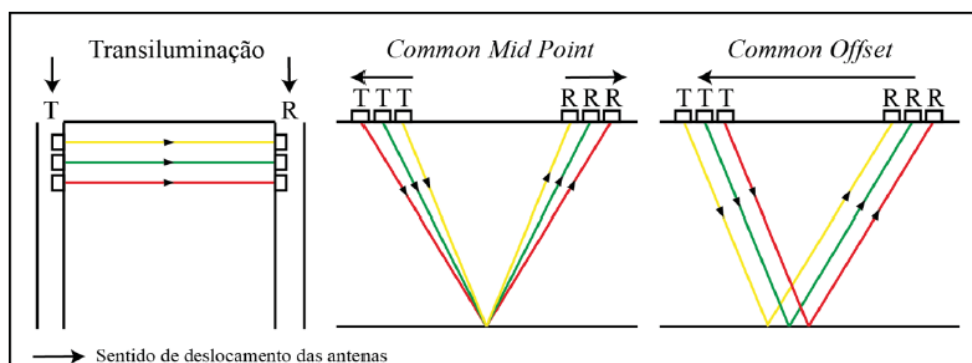
O GPR apresenta resultados mais efetivos em materiais eletricamente resistivos como areia, conglomerados, calcários e turfas. A diminuição da qualidade dos dados obtidos é frequentemente associada à presença de silte, argila e águas salinas. Esses materiais com maior condutividade atenuam a energia, limitando a profundidade de investigação (Jol & Bristow 2003).

O método GPR pode ser dividido em três etapas: aquisição, processamento e interpretação.

De acordo com Davis & Annan (1989), a resolução é inversamente proporcional à profundidade de alcance. Portanto, antenas de alta frequência geram dados mais detalhados, mas menores penetrações. Sendo assim, a escolha da frequência do sinal GPR define a profundidade de investigação e a resolução do levantamento geofísico.

O levantamento é classificado conforme o arranjo das antenas e pelo tipo de dado gerado, sendo eles: transiluminação, levantamento de velocidade (*Common Mid Point*) e perfil de reflexão (*Common Offset*) (Neal 2004) (Figura 4).

Figura 4 - Principais arranjos para a aquisição de dados de georadar. Na transiluminação, as antenas transmissora (T) e receptora (R) se deslocam verticalmente em subsuperfície. No *Common Mid Point*, as antenas se deslocam em sentidos opostos, modificando a relação de distância. Já no *Common Offset*, arranjo utilizado neste estudo, as antenas se deslocam no mesmo sentido, permanecendo a uma distância constante.



Fonte: Rosa, 2012.

A transiluminação é utilizada em poços. A antena transmissora é posicionada em um primeiro poço, enquanto a receptora é posicionada em um segundo poço. As antenas são deslocadas no interior dos poços produzindo imagens a partir da propagação da energia (*Baker et al.*, 2012).

O levantamento de velocidade (*Common Mid Point*) determina a variação da velocidade de propagação dos pulsos eletromagnéticos em subsuperfície, permitindo a conversão da profundidade das seções GPR, originalmente em tempo, para distância (Jol & Bristol 2003). Durante o levantamento o par de antenas transmissora e receptora são posicionadas a distâncias sucessivamente crescentes, em sentidos opostos em relação ao centro. Por isso esse levantamento é indicado para locais pouco extensos. A distância entre as antenas e o tempo até a recepção do sinal permite gerar curvas de um gráfico de velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas no substrato (*Baker et al.*, 2012).

O perfil de reflexão (*Common Offset*) é o método empregado para a aquisição de perfis de reflexões através do deslocamento simultâneo e no mesmo sentido das antenas transmissora e receptora, posicionadas a uma distância constante (*fixed offset*). Os sinais recebidos são empilhados verticalmente de acordo com o tempo decorrido desde a emissão até a recepção, e lateralmente segundo o deslocamento das antenas. Dessa forma é gerada uma seção GPR ou radargrama, que reflete a variação nas propriedades elétricas do meio, permitindo a identificação de feições ou de interfaces que possuam contraste em tais propriedades (*Baker et al.*, 2012).

Após o levantamento, a seção GPR é processada. O processamento depende dos objetivos e dos tipos de feições que se deseja investigar. A finalidade do processamento é ressaltar o que é considerado como informação e eliminar ou minimizar ruídos. Entretanto, durante a aplicação de técnicas para melhorar a qualidade do dado, deve-se atentar para a geração de artefatos, os quais podem culminar em erros de interpretação.

Os principais procedimentos aplicados são os seguintes: correção do tempo zero e da variação no tempo zero (*time-zero-drift*), correção da saturação do sinal com a remoção de baixas frequências (*dewow*), aplicação de ganhos para a ampliação dos sinais atenuados, aplicação de filtros de frequência e aplicação de filtros especiais para remoção de ruídos do ambiente e de ruídos sistemáticos, estimativa das velocidades para transformação do tempo de chegada das ondas em profundidade dos refletores, deconvolução, remoção de reflexões oriundas da superfície, migração e correção topográfica (Neal 2004).

### 3.5.1 Critérios de interpretação das radarfácies

As radarfácies, obtidas durante os levantamentos com georradar no arranjo *Common Offset*, apresentam um resultado semelhante ao das seções sísmicas. Por este motivo, a interpretação em ambos os métodos é semelhante, e têm como base os princípios da Sismoestratigrafia (Neal *et al.* 2002, Neal 2004).

De acordo com Rosa (2012), a principal diferença entre esses métodos refere-se à dimensão das feições observadas, já que a resolução dos dados sísmicos é muito inferior à dos dados de georradar. Enquanto com o georradar podem ser resolvidos refletores milimétricos a centimétricos, na sísmica de alta resolução se opera em faixas centimétricas a métricas e na sísmica convencional, sobre a qual foi desenvolvida a Sismoestratigrafia, a resolução é ainda menor. Portanto, a definição do significado genético das unidades interpretadas deve levar em consideração essa diferença fundamental.

A interpretação de seções sísmicas passa pela análise e identificação das características das reflexões, que agrupadas lateralmente formam os refletores. Neste caso, os refletores representam contrastes de impedância acústica relacionados com os materiais presentes em subsuperfície (Rosa



2012). Segundo Sangree & Widmier (1979), é possível interpretar os refletores como linhas de tempo, ou seja, é possível atribuir às reflexões um significado cronoestratigráfico.

De acordo com Neal (2004), os limites das unidades sísmicas e de radar são determinados pelas terminações de refletores, associado a limites superiores (truncamento erosivo, *toplap* e concordante) e inferiores (*onlap*, *downlap* e concordante). Essas unidades podem ser caracterizadas quanto a sua geometria externa e quanto a sua configuração interna, as quais caracterizam as radarfácies. A configuração interna das radarfácies pode ser descrita de acordo com a geometria, o mergulho, a continuidade e a amplitude, além da relação entre os refletores.

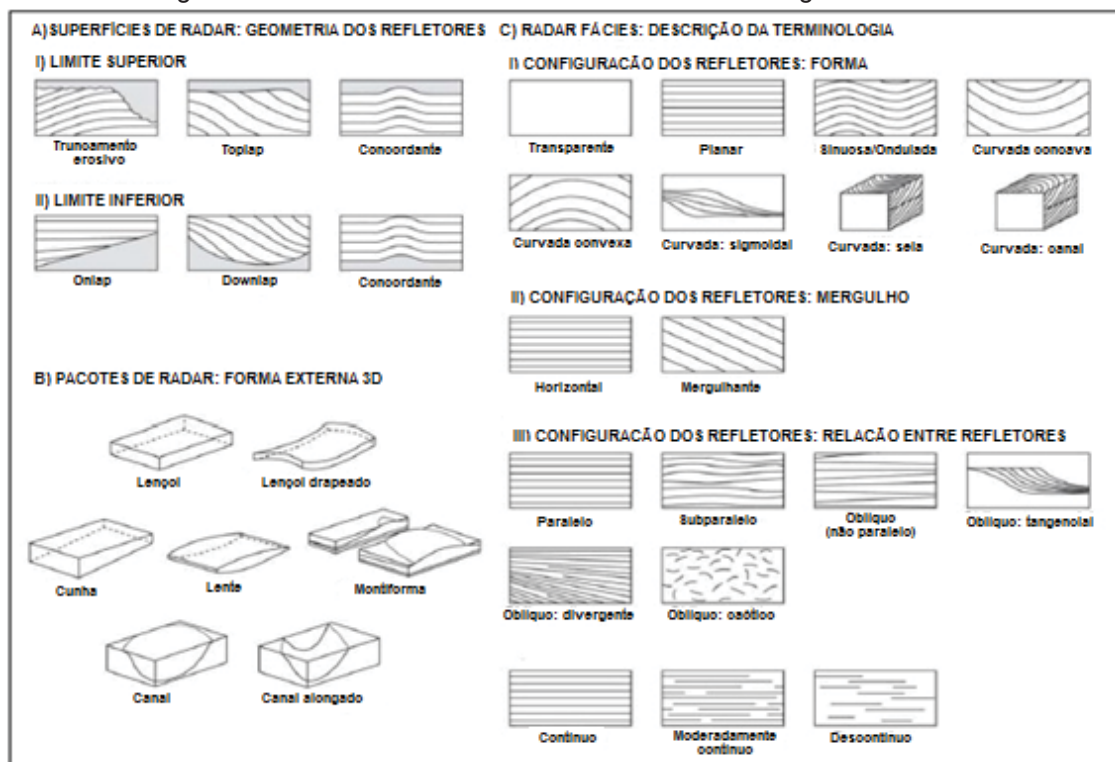
A definição das radarfácies, bem como a identificação dos limites entre as unidades são a base para a interpretação dos processos operantes nos diferentes ambientes (Reading & Colinson 1996). Contudo, devido à natureza e escala do registro, deve-se ter cuidado com reflexões presentes nas seções que não sejam relacionadas com as estruturas sedimentares. Horizontes correspondentes ao aquífero freático ou gerados por processos diagenéticos, reflexões geradas por falhas e fraturas, difrações geradas por alvos pontuais, além de ruídos sistemáticos e do ambiente podem estar presentes. Cabe ao intérprete lidar com esses problemas, desenvolvendo técnicas para identificar, remover ou desconsiderar tais ruídos. Por este motivo, a definição de critérios e o cruzamento com outras informações devem ser realizados para uma interpretação mais confiável (Rosa 2012).

### 3.5.2 Tipos de terminações das radarfácies

Segundo Neal et al. (2002), mesmo com o grande contraste de escalas, os contrastes físicos que definem as unidades sedimentares são essencialmente os mesmos, gerando padrões e estruturas internas similares. Nesse sentido, a estratigrafia de radar compreende terminologias análogas às da Sismoestratigrafia (Neal et al. 2002, Neal 2004), conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5- Padrões descritivos dos elementos de estratigrafia de radar.



Fonte: Modificado de Neal, 2004.

### 3.5.2.1 Truncamento erosivo

Segundo Mitchum *et al.* (1977) truncamento é a terminação lateral abrupta de um estrato contra uma discordância erosiva ou resultante de processos estruturais, como falhamentos e dobramentos. Na escala do GPR, essa terminação é marcada, em geral, pela presença de falhas e/ou fraturas, as quais podem ser identificadas pelo deslocamento entre os refletores, ou como um novo refletor que trunca o acamamento sedimentar, impondo um deslocamento a essas superfícies.

### 3.5.2.2 Terminações com o limite inferior

De acordo com Mitchum *et al.* (1977) as terminações basais das reflexões são denominadas de *baselap* que podem ser subdivididas em *onlap* e *downlap*.

As terminações em *onlap* são reflexões sísmicas interpretadas como estratos inicialmente horizontais terminando progressivamente contra uma

superfície inclinada, ou como um estrato inicialmente inclinado terminando progressivamente contra uma superfície de maior inclinação.

As terminações em *downlap* são interpretadas como estratos inicialmente inclinados com terminação em mergulho para baixo contra uma superfície inclinada ou horizontal.

### 3.5.2.3 Terminações com o limite superior

Segundo Mitchum *et al.* (1977) essas terminações incluem além do truncamento erosivo, o *toplap*. O *toplap* é uma terminação de reflexão interpretada como um hiato deposicional. Na prática, muitos limites deposicionais marcados pelo *toplap* são preferencialmente locais, e na maioria dos casos não apresentam correlação regional.

### 3.5.2.4 Terminações não sistemáticas: *Offlap*, Convergência Interna e Truncamentos Aparentes.

*Offlap* é um termo comumente utilizado pelos sísmicos como padrão de progradação de estratos em direção ao interior da bacia (Mitchum *et al.* 1977). Na escala do GPR a utilização do termo *offlap* é atribuída às reflexões inclinadas não sistemáticas dos refletores (Andrade 2005).

Convergência interna ocorre quando os refletores tendem a se adelgaçar entre os demais refletores, ficando abaixo do limite de resolução e sumindo entre outros (Mitchum *et al.* 1977).

Os truncamentos aparentes ocorrem quando as reflexões terminam abaixo de um refletor pouco inclinado, ou seja, referem-se às terminações em baixo ângulo entre estratos, de modo que o limite real entre ambos esteja abaixo do limite de resolução (Mitchum *et al.* 1977).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO

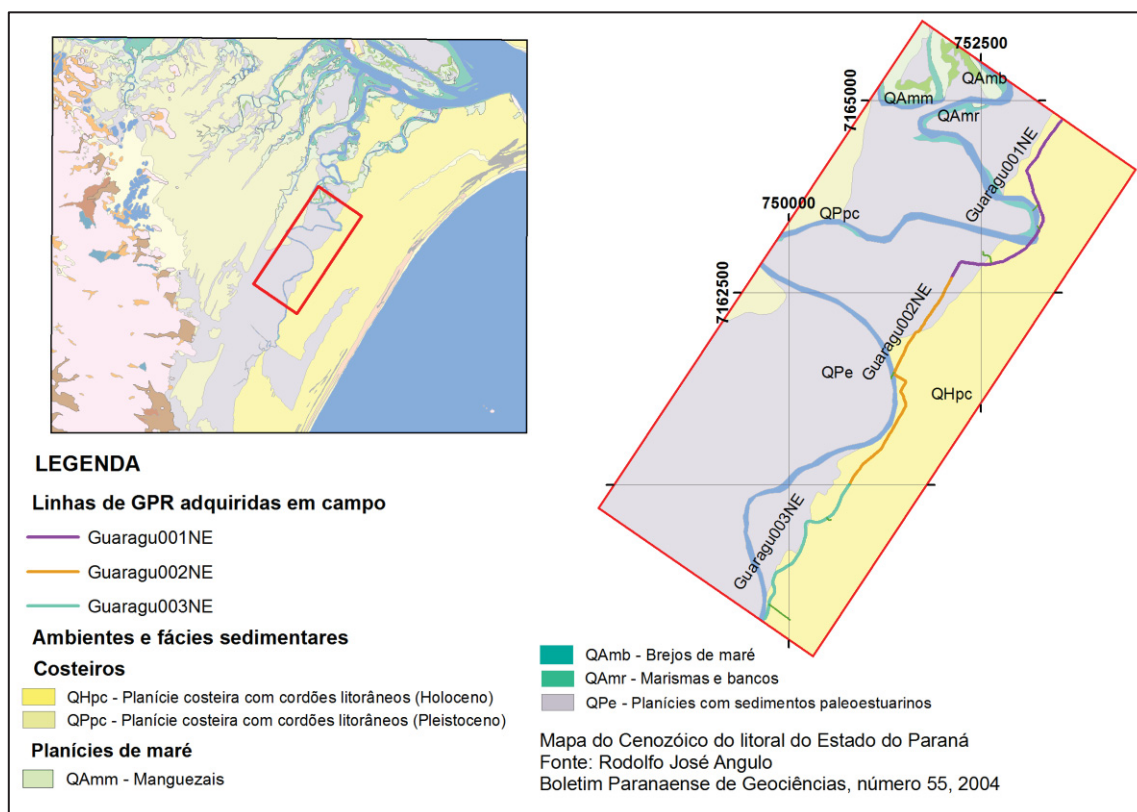
O levantamento planialtimétrico consistiu na coleta da altitude e do posicionamento geográfico das linhas de GPR em campo, através do Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS – *Differential Global Positioning System*). O equipamento de DGPS utilizado para o trabalho foi da marca *Trimble®*, ajustado para coletar dados de posicionamento a cada segundo, enviando as informações do posicionamento para o receptor modelo Pro-XRS.

A correção diferencial dos dados obtidos foi realizada somente no pós-processamento, através das coordenadas da estação UFPR - Curitiba, disponibilizada pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), obtidas de hora em hora nos dias da coleta. Com o programa *Pathfinder®*, além do tratamento dos dados, é possível escolher que tipo de informação inserir no banco de dados (altitude, coordenadas, data/hora, distância horizontal) gerando um banco de dados em um sistema de informações geográficas. Desse modo, com uma imagem georreferenciada, é possível obter a localização das linhas levantadas com o GPR.

### 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO GPR

O método GPR foi aplicado para caracterizar os depósitos sedimentares da barreira holocênica em subsuperfície. O local investigado foi o setor da planície costeira paranaense que marca o início, segundo o mapa de Angulo (1992, 2004), da progradação costeira e a formação da barreira regressiva holocênica (Figura 6).

Figura 6- Localização das linhas de GPR na área pesquisada sobreposta ao Mapa do Cenozóico de Angulo (2004).

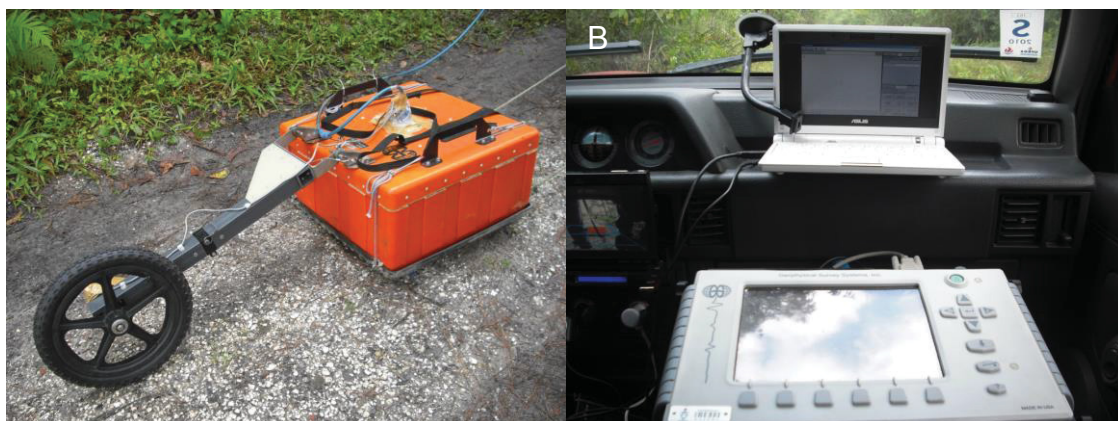


Fonte: Mapa do Cenozóico de Angulo, 2004.

#### 4.2.1 Aquisição

A pesquisa utilizou para a aquisição das linhas o equipamento fabricado pela GSSI modelo SIR 3000. O conjunto do equipamento é composto por um par de antenas (transmissora e receptora) com frequência de 200 MHz, caixa de blindagem da antena (Figura 7A) e console (Figura 7B). Para a orientação e o registro da localização das linhas levantadas o DGPS foi acoplado ao console do GPR.

Figura 7– (A) Antena de 200 MHz utilizada durante a aquisição de dados e (B) Console do GPR modelo SIR 3000.



Fonte: o Autor, 2015.

O arranjo empregado foi o *Common Offset*. Durante a aquisição o equipamento foi configurado com filtro de ganho e de frequência para a redução de ruídos para melhorar a qualidade dos dados adquiridos. A constante dielétrica (10) utilizada para o levantamento representa uma velocidade intervalar média de 0,09 m/ns (Davis & Annan 1989).

A constante dielétrica utilizada, além de ser a mais indicada para o tipo de sedimento do substrato, também foi definida de acordo com os levantamentos anteriores realizados na planície costeira paranaense (Souza 2005; Becker 2012) que obtiveram bons resultados com a correlação de profundidade das fácies identificadas em sondagens e afloramento.

Ao todo foram adquiridas 27 seções no município de Pontal do Paraná, das quais foram escolhidas três seções (Guaragu001NE, Guaragu002NE e Guaragu003NE) que totalizam aproximadamente 8,7 km. As seções de radar escolhidas estão localizadas no setor da planície costeira em que se iniciou a formação da barreira holocênica. A localização das linhas pode ser observada na Figura 06. A aquisição de dados foi realizada geralmente em *strike*, paralelo à linha de costa na Estrada Velha do Pontal.

#### 4.2.2 Processamento

O processamento dos dados foi realizado nos programas Radan 6.6<sup>®</sup> (*Radar data analyser*) e Prism 2.5<sup>®</sup>. Inicialmente no software Radan 6.6 foi corrigido o tempo zero (*time zero drift*); na sequência foi utilizada a ferramenta

*Background Removal – FIR*; em seguida o dado foi processado no Prism 2.5, em que se aplicou a *Ormsby bandpass*; por fim, novamente no Radan 6.6 foi aplicado o *Range Gain*. A correção topográfica não foi efetuada, pois o levantamento foi realizado em uma estrada plana.

#### 4.2.3 Interpretação

A interpretação seguiu os critérios propostos por Neal (2004), foram determinadas superfícies de radar de primeira e segunda ordem.

O critério estabelecido para interpretação das superfícies de radar de primeira ordem foi a identificação das terminações de radar que apresentaram maior continuidade lateral. A nomenclatura das superfícies de radar de primeira ordem foi modificada a partir de Neal (2004), sendo as superfícies de radar iniciadas com a sigla Sf seguidas da ordem cronológica (base para o topo), e precedida do tipo de superfície (Dc-descontinuidade).

As superfícies de 2º ordem foram nomeadas de acordo com suas feições características, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1- Descrição das siglas utilizadas para a caracterização das superfícies de 2º ordem.

<b>Radarfácies</b>	<b>Código</b>
Plana descontínua	Pd
Sigmoide com mergulho de até 13°	Sg
Oblíqua com truncamentos	Ot
Oblíqua com mergulho de baixo ângulo (3°)	Ob
Superfície côncava com truncamentos	Ct
Plana com baixo ângulo de mergulho com truncamentos	Pt
Superfície convexa multidirecional	Cm
Superfícies com mergulhos multidirecionais de baixo ângulo	Mb
Superfície oblíqua truncada	Oat
Superfície oblíqua com baixo ângulo de mergulho	Ppb

Fonte: O Autor, 2015.

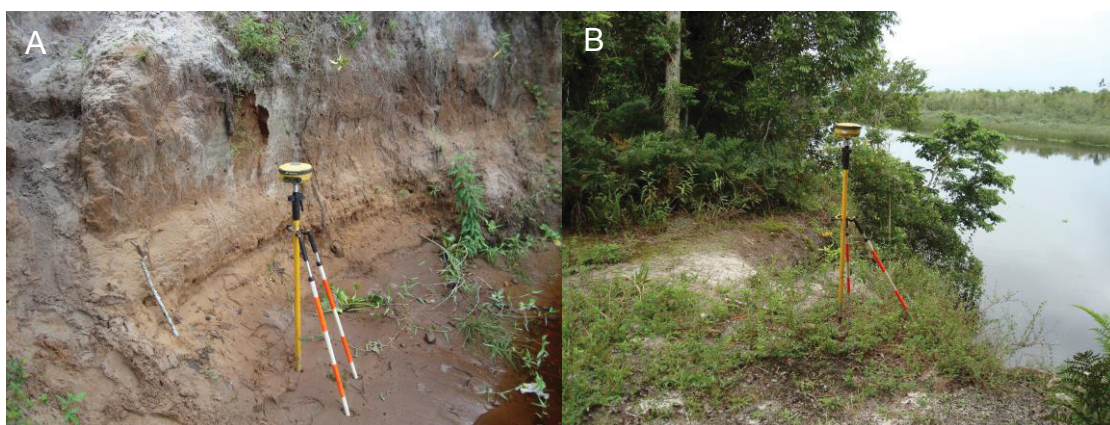


### 4.3 DESCRIÇÃO DE AFLORAMENTOS

A erosão fluvial da barreira holocênica pelo rio Guaraguaçu expõe o início da progradação da barreira em afloramentos ao longo de sua margem. A caracterização e interpretação das fácies dos afloramentos da barreira regressiva foram realizadas através da descrição de dois perfis estratigráficos verticais denominados AF-01 e AF-02.

As elevações dos afloramentos descritos foram determinadas a partir da ocupação de um ponto base, o qual foi localizado no início da Estrada Velha de Pontal, com um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) do modelo Hiper Topcon L1 L2, durante 2 h e 33 min. Concomitante a ocupação da base, foi realizada a tomada de posição com outro GPS, também do modelo Hiper Topcon L1 L2, sendo registrados dados de posição e altimetria da base e do topo dos afloramentos pelo tempo de 10 a 15 min (Figura 8). O pós-processamento dos dados brutos consistiu primeiramente no ajuste do ponto base, a partir de dados oficiais da RBMC das estações UFPR – Curitiba e Araquari no programa *Topcon Tolls*®. Após a correção do ponto base, o mesmo serviu como referencial para o ajuste dos dados adquiridos nos afloramentos. O desvio padrão da precisão dos dados tratados variou entre 1,26 m no topo do afloramento AF-01 a 0,02 m no topo do AF-02. A variação observada é justificada pela geometria orbital dos satélites GPS durante a aquisição do dado em campo e por erros de multicaminhamento, dada as condições meteorológicas do dia que podem resultar na aquisição de dados indiretos, refletidos para o receptor.

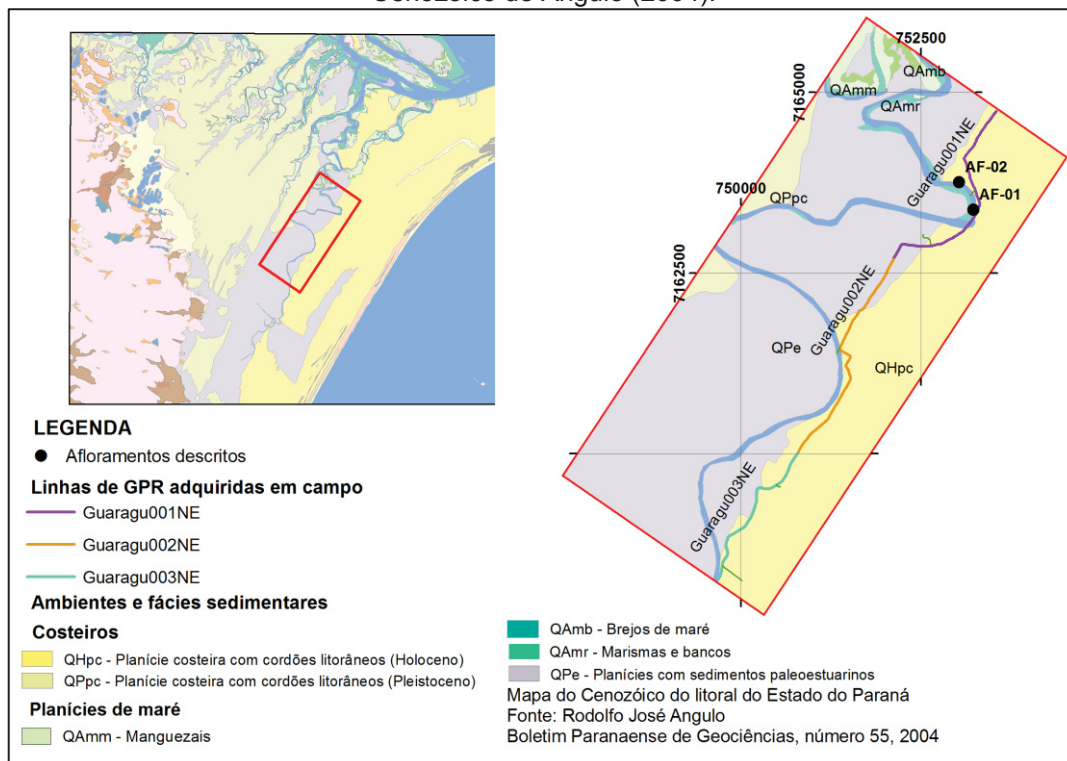
Figura 8– (A) Ocupação da base do afloramento com o GPS modelo Hiper Topcon L1 L2 e (B) Tomada de posição com o GPS sobre o topo do afloramento.



Fonte: O Autor, 2015.

A denominação, as coordenadas, a elevação e a precisão do levantamento altimétrico dos afloramentos estão na Tabela 2.

Figura 09 - Localização dos afloramentos descritos na área pesquisada sobreposta ao Mapa do Cenozóico de Angulo (2004).



Fonte: O Autor, 2015.

Tabela 2– Afloramentos descritos e dados obtidos durante o levantamento de campo

Afloramento	Coord. (UTM/SAD 69)		Elevação topo (m)	Desv. Padrão topo (m)	Elevação base (m)	Desv. Padrão base (m)
	Latitude	Longitude				
AF-01	7.163.742	753.012	5,49	1,26	0,75	0,03
AF-02	7.163.426	753.273	5,09	0,02	0,12	0,60

Fonte: O Autor, 2015.

Na barreira foram identificadas quatro fácies deposicionais, seguindo o conceito definido por Walker & James (1992) pelo qual fácies sedimentar é um corpo de rocha caracterizado por seus atributos físicos, não confinados a uma posição estratigráfica e definido a partir de critérios descritivos.

A classificação das fácies foi realizada com base no código de fácies proposto por Miall (1996) para ambiente fluvial, sendo consideradas as características sedimentológicas (composição, granulometria e variações



texturais), estruturas sedimentares, feições arquiteturais (espessura, forma e contato das camadas), paleocorrentes e icnofósseis.

#### 4.4 VIBROTESTEMUNHAGEM

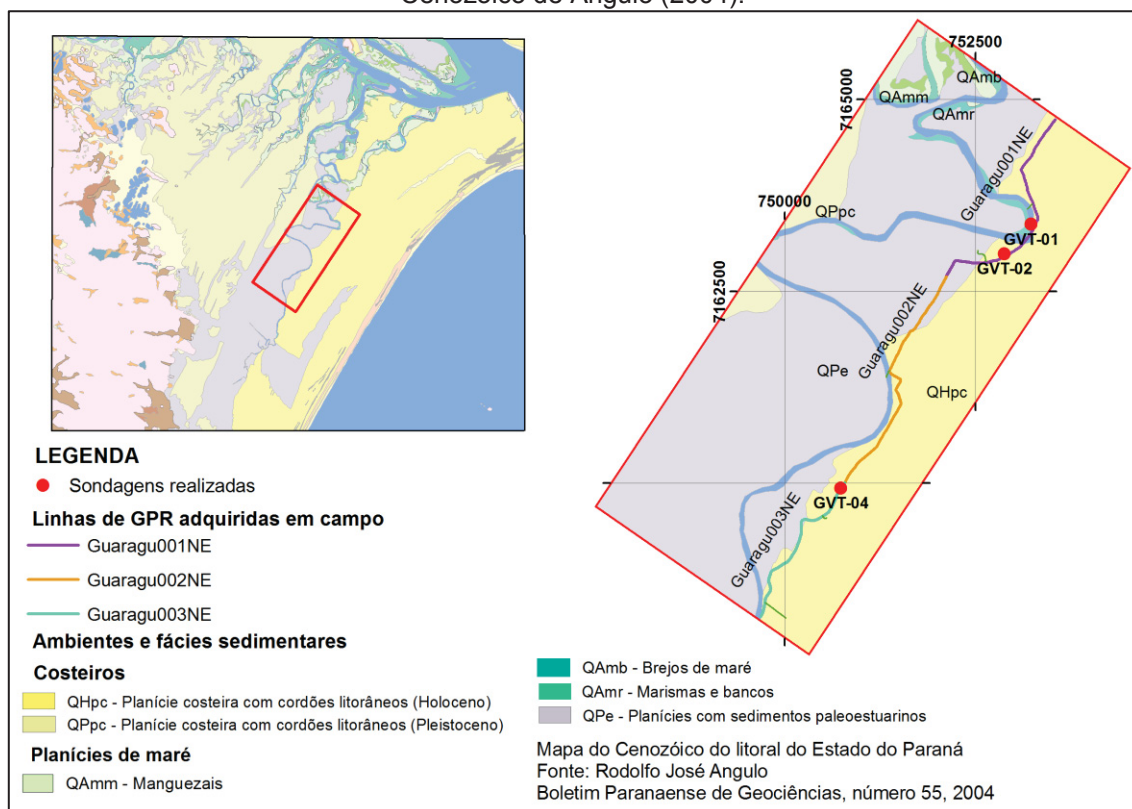
##### 4.4.1 Programação de Sondagens

A partir das interpretações das linhas adquiridas com o GPR na Estrada Velha do Pontal foram executadas sondagens denominadas Guaraguaçu Vibrotestemunhagem (GVT).

A localização das sondagens na área de pesquisa pode ser observada na Figura 8– (A) Ocupação da base do afloramento com o GPS modelo Hiper Topcon L1 L2 e (B) Tomada de posição com o GPS sobre o topo do afloramento.

As fácies nos testemunhos de sondagem foram descritas, assim como as fácies dos afloramentos, seguindo o conceito definido por Walker & James (1992).

Figura 10- Localização das sondagens realizadas na área pesquisada sobreposta ao Mapa do Cenozóico de Angulo (2004).

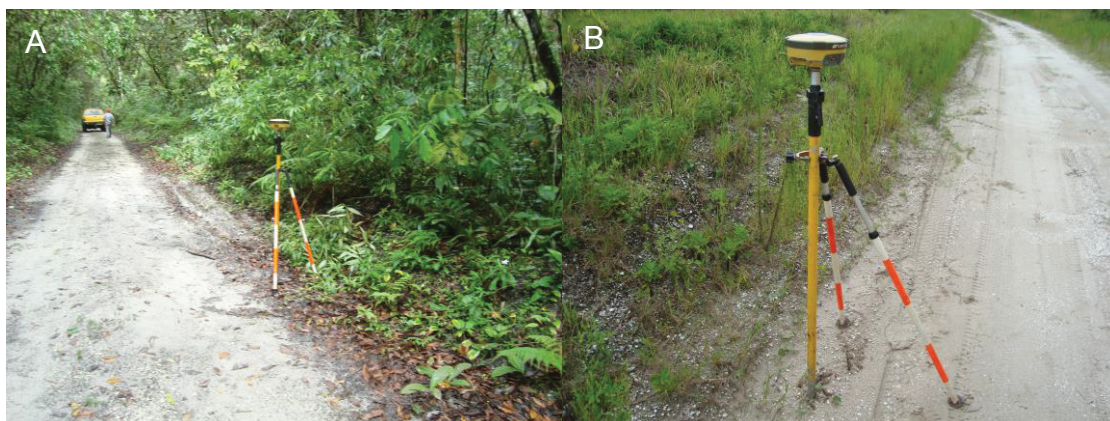


Fonte: O Autor, 2015.

O critério para escolha dos locais de sondagem foi definido de acordo com a profundidade máxima de alcance do método (até 6 metros), e pela profundidade em que se encontravam as principais superfícies de radar interpretadas.

As coordenadas para os furos foram extraídas diretamente dos arquivos DGPS adquiridos durante o levantamento GPR. As elevações foram determinadas conforme a metodologia utilizada para a obtenção das elevações dos afloramentos, sendo ocupados com GPS os locais em que foram executadas as sondagens (Figura 11).

Figura 11 – (A) Aquisição de posição com o GPS modelo Hiper Topcon L1 L2 do local de execução da sondagem GVT-02 e (B) Tomada de posição do local em que foi realizada a sondagem GVT-04.



Fonte: O Autor, 2015.

As coordenadas, elevação das sondagens e a precisão do levantamento altimétrico estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Sondagens executadas

Sondagem	Linha	Coord. (UTM/SAD 69)		Elevação (m)	Desv. Padrão (m)
		Latitude	Longitude		
GVT-01	Garagu_001NE	7.163.367	753.251	0,75	0,03
GVT-02	Garagu_001NE	7.162.987	752.878	5,13	0,39
GVT-04	Garagu_003NE	7.159.939	750.737	5,35	0,01

Fonte: O Autor, 2015.

#### 4.4.2 Execução das sondagens

O vibrotestemunhador consiste em um motor estacionário quatro tempos acoplado a um mangote de construção. O mangote é conectado por uma braçadeira a um tubo de alumínio de seis metros de comprimento e 7,5 cm de diâmetro. O peso e a vibração criada pelo mangote resultam na penetração do tubo de alumínio no substrato, efetuando a amostragem (Figura 12).

Figura 12 - Execução das sondagens GVT-04 (A) e GVT-02 (B).



Fonte: O Autor, 2015.

#### 4.4.3 Descrição dos testemunhos

Os testemunhos retirados com o uso do vibrotestemunhador foram cortados em laboratório transversalmente a cada 1 metro. Posteriormente cada trecho de um 1 metro foi cortado longitudinalmente com a utilização de um disco abrasivo.

Após o corte longitudinal os tubos foram numerados e abertos em duas metades (Figura 13), sendo em seguida fotografados.

Os testemunhos foram descritos de acordo com o conceito de fácies de Walker (1992), considerando aspectos composicionais, estruturas internas e conteúdo fóssilífero, além da observação da textura e relações de contato com as demais fácies.

Figura 13 - Corte longitudinal dos testemunhos de sondagem com disco abrasivo.



Fonte: O Autor, 2015.

A nomenclatura das fácies foi adaptada de Miall (1996), sendo identificadas pela primeira letra em caixa alta indicando a granulometria, seguido de letra em caixa baixa indicando as estruturas sedimentares.

## 5. RESULTADOS

Os principais resultados são: (1) definição das superfícies de primeira ordem, através da análise e identificação dos padrões de radarfácies com maior continuidade lateral nos radargramas; (2) identificação das superfícies limitantes de segunda ordem, a partir da caracterização dos padrões de radarfácies, segundo suas formas e terminações; (3) descrição de fácies sedimentares em afloramentos e testemunhos de sondagem.

### 5.1 SUPERFÍCIES LIMITANTES DE PRIMEIRA ORDEM

As superfícies de primeira ordem são geralmente horizontalizadas, irregulares e apresentam amplitude variando entre baixa e alta. Essas superfícies podem representar descontinuidades de caráter erosivo ou de hiato deposicional. Os refletores apresentam-se predominantemente em *downlap* sobre estas superfícies.

A superfície Sf1-Dc destaca-se em todas as seções analisadas por sua grande amplitude e continuidade lateral, ocorrendo a partir de 15 m. A superfície Sf2-Dc é horizontalizada e possui grande continuidade lateral.

### 5.2 SUPERFÍCIES LIMITANTES DE SEGUNDA ORDEM

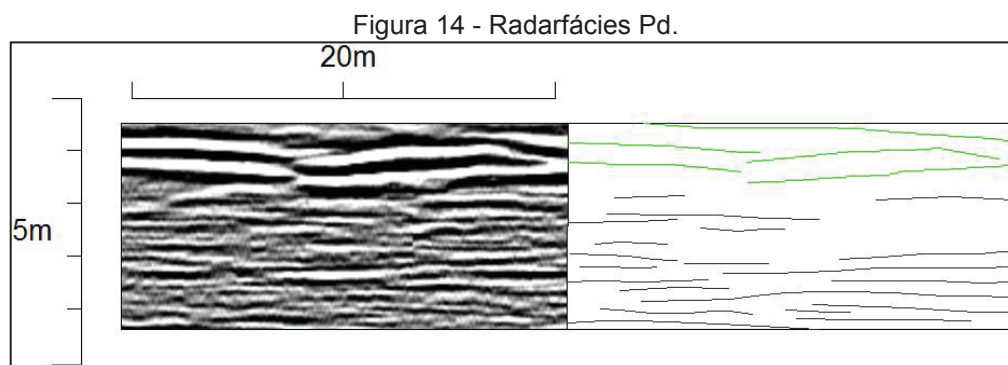
Foram identificadas 9 superfícies de segunda ordem, denominadas radarfácies (Pd, Sg, Ot, Ob, Ct, Pt, Cm, Mb e Ppb). As radarfácies ocorrem em três unidades principais (inferior, intermediária e superior), os quais são delimitadas por superfícies de radar de primeira ordem Sf1-Dc e Sf2-Dc.

Nos radargramas analisados alguns padrões característicos puderam ser observados, estes padrões foram agrupados segundo morfologia dos refletores (geometria, mergulho, continuidade, forma) e suas interrelações de acordo com Neal (2004).



### 5.2.1 Radarfácies Pd

Os refletores possuem forma plana e são descontínuos (Figura 14). A configuração interna dessa radarfácies é paralela à subparalela.



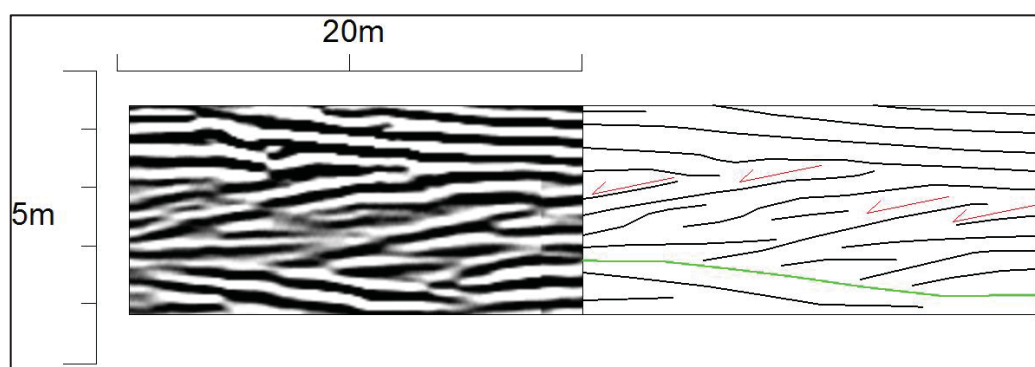
Fonte: O Autor, 2015.

### 5.2.2 Radarfácies Sg

Os refletores possuem forma sigmoide com mergulho multidirecional de até  $13^\circ$  (Figura 15). Os refletores apresentam relação oblíqua com espaçamento decamétrico e são contínuos. Possuem amplitude média a alta.

O limite superior apresenta terminação em *toplap*, enquanto seu limite inferior está em *downlap* em relação à superfície Sf1-Dc.

Figura 15 - Radarfácies Sg, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.



Fonte: O Autor, 2015.

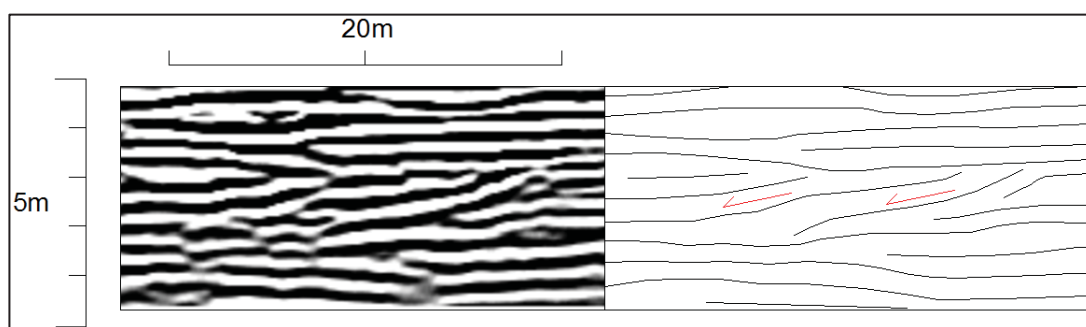
### 5.2.3 Radarfácies Ot

Os refletores possuem forma oblíqua tangencial, com mergulho de até  $10^\circ$  (Figura 16). Os refletores têm relação subparalela com truncamentos

oblíquos entre os conjuntos. São contínuos e possuem espaçamento decamétrico. Apresentam amplitude alta.

O limite superior desse refletor esta em *toplap*, enquanto seu limite inferior está em *downlap*, truncando a superfície inferior.

Figura 16 - Radarfácies Ot, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.



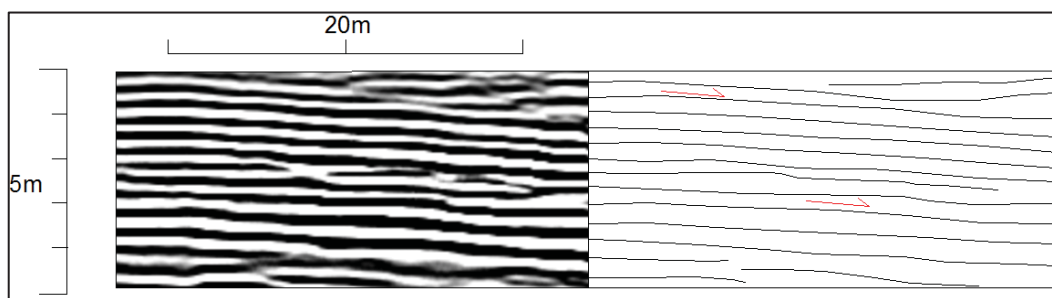
Fonte: O Autor, 2015.

#### 5.2.4 Radarfácies Ob

Os refletores possuem forma plana com mergulho de  $3^\circ$  (Figura 17). São contínuos e apresentam amplitude alta.

A radarfácies Ob apresenta configuração subparalela e extensão lateral decamétrica. O limite superior e inferior dessa terminação é concordante.

Figura 17 - Radarfácies Ob, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.

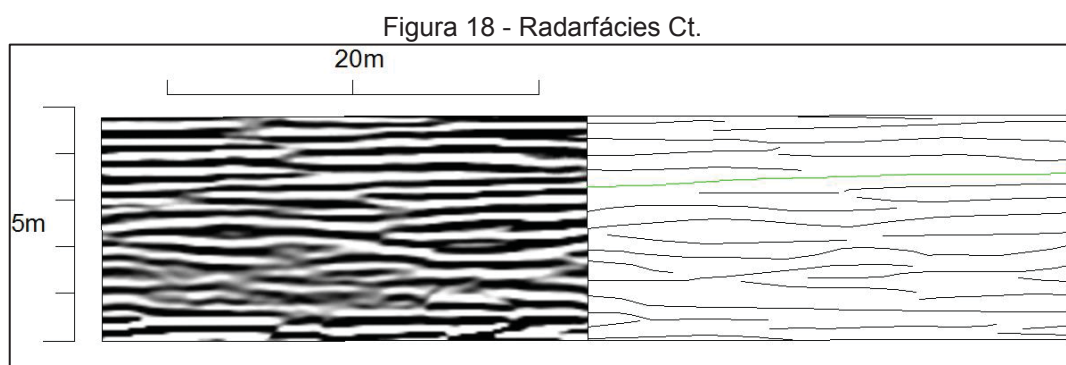


Fonte: O Autor, 2015.

#### 5.2.5 Radarfácies Ct

Os refletores possuem feições suavemente côncavas (Figura 18). Apresentam mergulho de baixo ângulo. Apresentam relação subparalela com truncamentos oblíquos. São contínuos e possuem espaçamento centimétrico. Apresentam amplitude alta.

A radarfácies Ct pode ser interpretada como correspondente a estruturas do tipo swaley.



Fonte: O Autor, 2015.

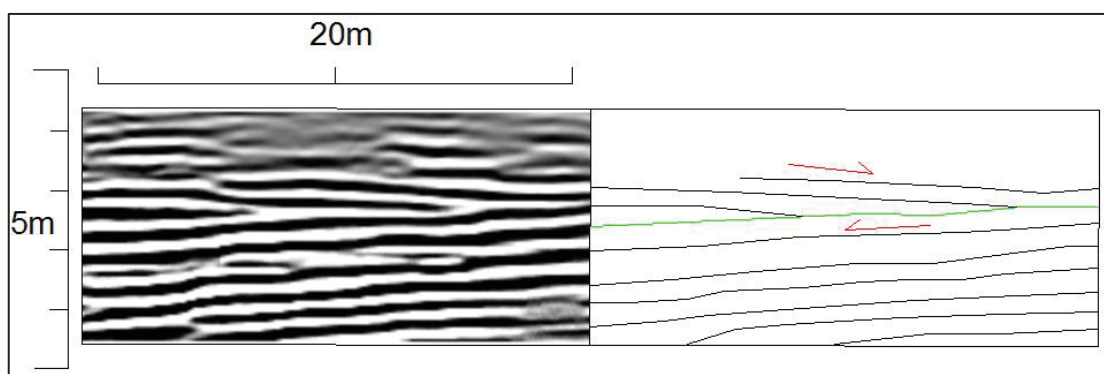
### 5.2.6 Radarfácies Pt

Os refletores possuem forma plana com mergulho de baixo ângulo. Apresentam relação oblíqua com truncamentos oblíquos (Figura 19). São descontínuos e apresentam espaçamento decamétrico. Possuem amplitude baixa a média.

O limite superior dessa terminação está em *toplap*, enquanto seu limite inferior está em *downlap*, truncando a superfície inferior.

Essa radarfácies pode ser interpretada como sendo depósitos de dunas subaquosas de cristas angulosas a linguóide.

Figura 19 - Radarfácies Pt, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.



Fonte: O Autor, 2015.

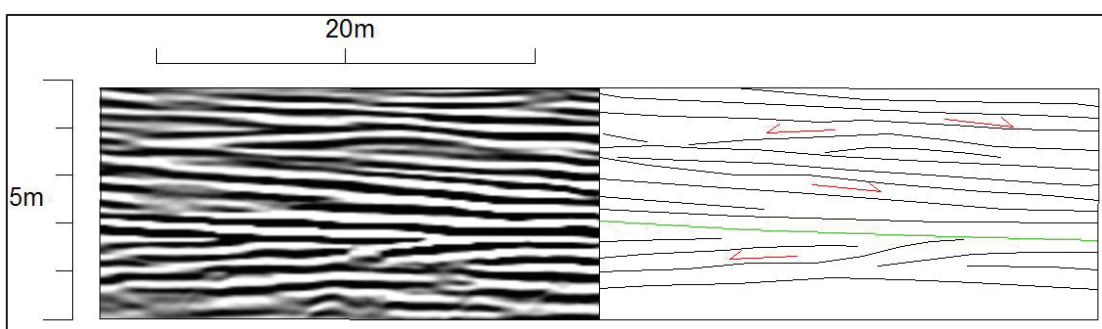


### 5.2.7 Radarfácies Cm

Os refletores possuem feições suavemente convexas. Apresenta mergulho de até 5° multidirecional (Figura 20). Os refletores têm relação subparalela com truncamentos oblíquos. São contínuos e possuem espaçamento decamétrico. Apresentam amplitude média.

Essa feição pode estar está associada a estratificação cruzada hummocky.

Figura 20 - Radarfácies Cm, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.

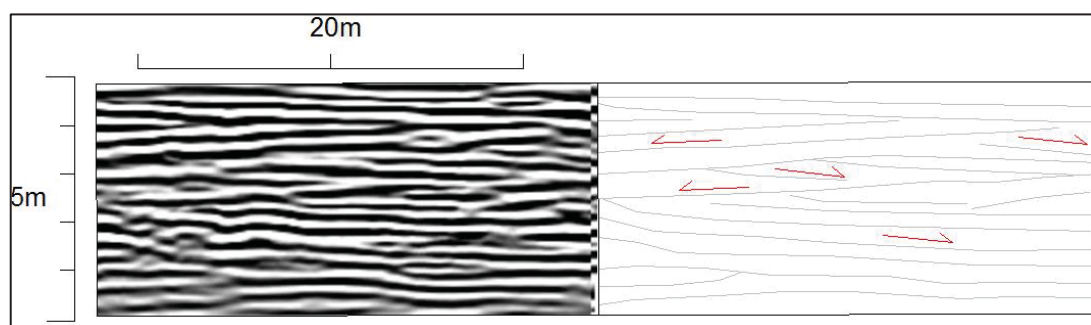


Fonte: O Autor, 2015.

### 5.2.8 Radarfácies Mb

Os refletores possuem forma plana com mergulho de baixo ângulo multidirecional (Figura 21). Os refletores têm relação subparalela com truncamentos oblíquos entre os conjuntos. São contínuos e possuem espaçamento decamétrico. Apresentam amplitude baixa a alta.

Figura 21 - Radarfácies Mb, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.



Fonte: O Autor, 2015.

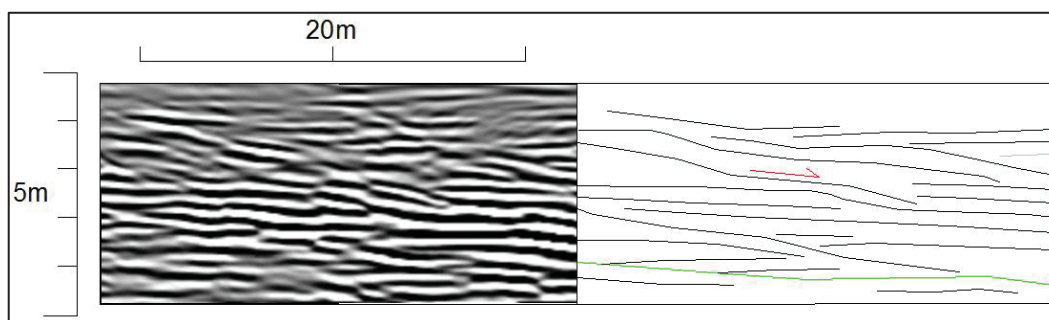
### 5.2.9 Radarfácies Oat

Os refletores possuem forma oblíqua tangencial com mergulho de até 15° (Figura 22). Os refletores têm relação oblíqua com truncamentos oblíquos entre os conjuntos. São descontínuos e possuem espaçamento decamétrico. Apresentam amplitude média.

Esses refletores apresentam o limite superior com terminação em *toplap*, seu limite inferior está em *downlap* em relação a superfícies de descontinuidade como a Sf2-Dc.

Essa radarfácies pode ser interpretada como um depósito de migração de barras arenosas.

Figura 22 - Radargrama e a radarfácies Oat, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.



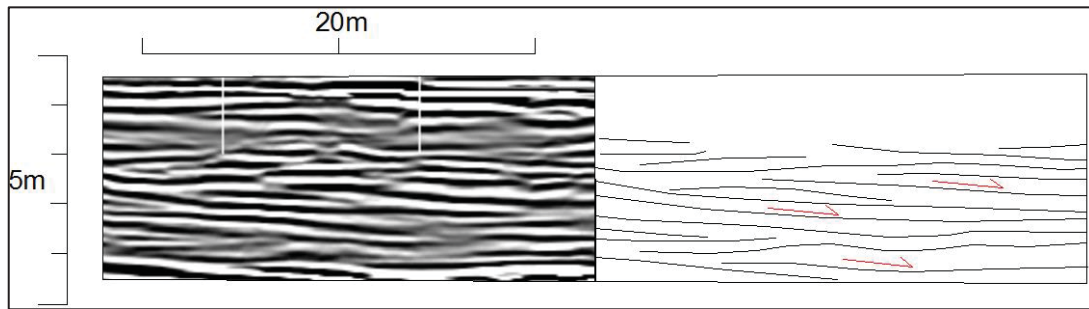
Fonte: O Autor, 2015.

### 5.2.10 Radarfácies Ppb

Os refletores possuem forma plana com mergulho de até 3° (Figura 23). Os refletores têm relação subparalela. São contínuos e possuem espaçamento decamétrico. Apresentam amplitude geralmente alta.

Essa radarfácies possui em seu limite superior terminação em *toplap*, enquanto seu limite inferior tem terminação em *downlap*.

Figura 23 - Radarfácies Ppb, com o sentido de mergulho indicado pelas setas em vermelho.



Fonte: O Autor, 2015.

### 5.3 FÁCIES SEDIMENTARES NOS AFLORAMENTOS

As fácies descritas da barreira holocênica são constituídas principalmente por areia quartzosa com granulação fina e muito fina. Na Tabela 4 estão discriminadas as fácies descritas e seus respectivos códigos.

Foram observados com frequência fragmentos de conchas e detritos vegetais. Encontra-se em abundância também *Ophiomorpha* sp. preenchidos e estruturas de escape.

Tabela 4- Fácies identificadas nos afloramentos da barreira holocênica.

Fácies	Código
Areia com estratificação cruzada acanalada	St
Areia com estratificação cruzada plana	Sp
Areia com estratificação cruzada de baixo ângulo	Sli
Areia com estratificação cruzada sigmoide	Ssg

Fonte: O Autor, 2015.

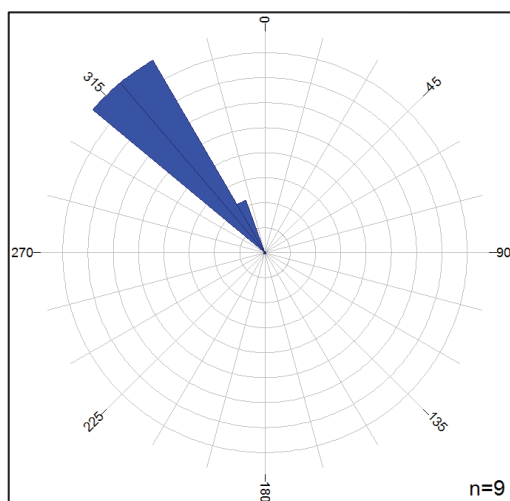
#### 5.3.1 Areia com estratificação cruzada acanalada (Fácies St)

A fácies St é formada por estratos lenticulares com 5 a 40 cm de espessura (Figura 25 e Figura 26) com continuidade lateral métrica, compostos por areia fina a média, moderadamente a bem selecionada. Os estratos apresentam estratificação cruzada composta por planos claros e escuros constituídos respectivamente por areia fina e média. Os sets ocorrem por vezes deformados por estruturas de escape e *Ophiomorpha* sp.

A fácies St ocorre abaixo, ou ao lado de fácies Sli. A medida das paleocorrentes dessa fácies apresenta direções preferenciais para N316/21, N320/15 e N330/17 (Figura 24).

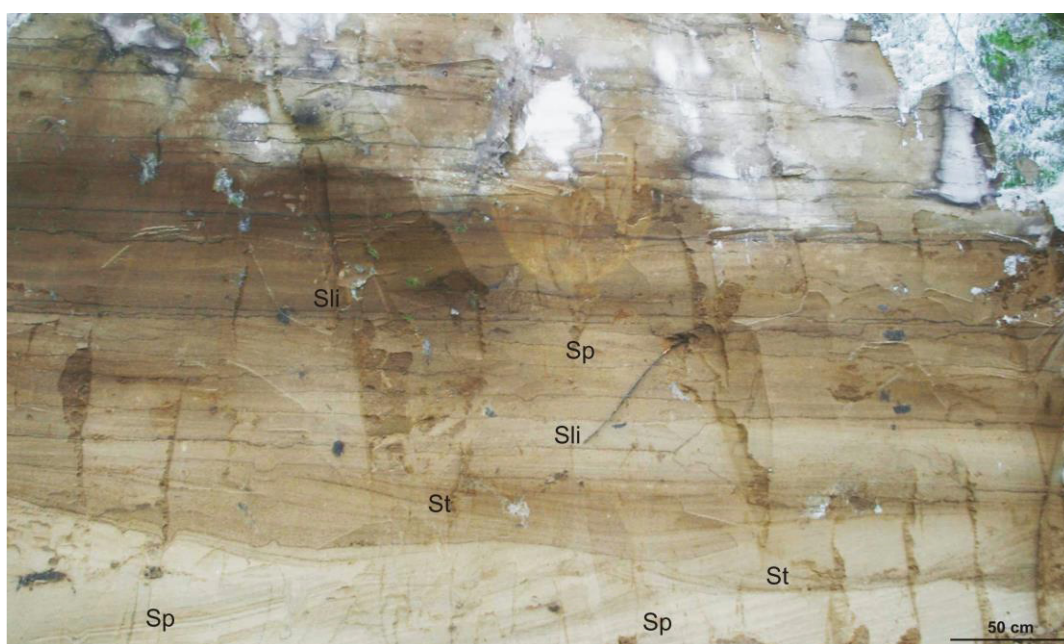
Esta fácies foi interpretada como correspondente a dunas subaquosas de cristas angulosas a linguóide, formadas em regime de fluxo inferior.

Figura 24 – Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies St, que indica paleocorrente com fluxo para NW.



Fonte: O Autor, 2015.

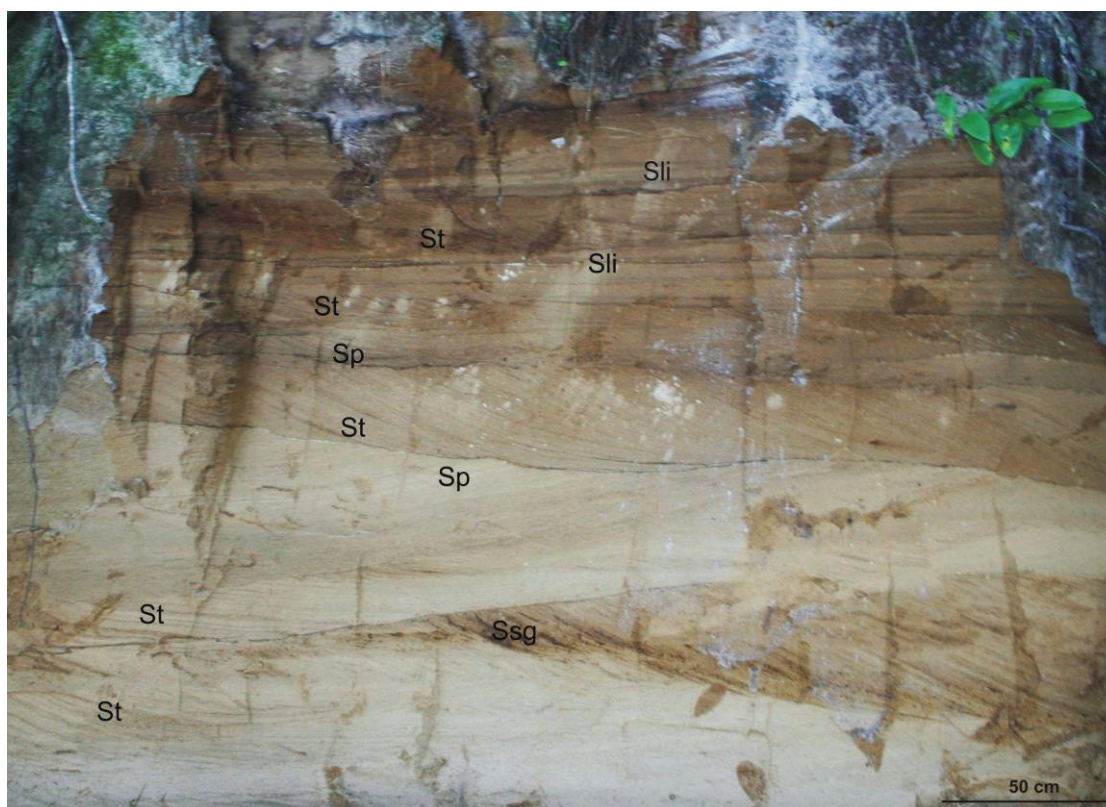
Figura 25 – Fácies de areia com estratificação cruzada acanalada (St), plana (Sp) e de baixo ângulo (Sli) no afloramento 02. A localização do afloramento 02 pode ser observada na figura 07.



Fonte: O Autor, 2015.



Figura 26 - Fácies descritas no afloramento 02: Areia com estratificação cruzada acanalada (St), plana (Sp), baixo ângulo (Sli) e sigmoide (Ssg).



Fonte: O Autor, 2015.

### 5.3.2 Areia com estratificação cruzada plana (Fácies Sp)

A fácies Sp (Figuras 25, 26 e 27) é constituída por sets de 10 a 20 cm de espessura, compostos por areia fina a média, bem a moderadamente selecionada. Nos estratos pode-se observar estratificação cruzada formada por planos claros e escuros constituídos por areia média e grossa.

Esta fácies possui paleocorrentes com direções preferenciais variando entre N350/15 e N306/06 (Figura 28), apresentando contatos superiores e inferiores erosivos.

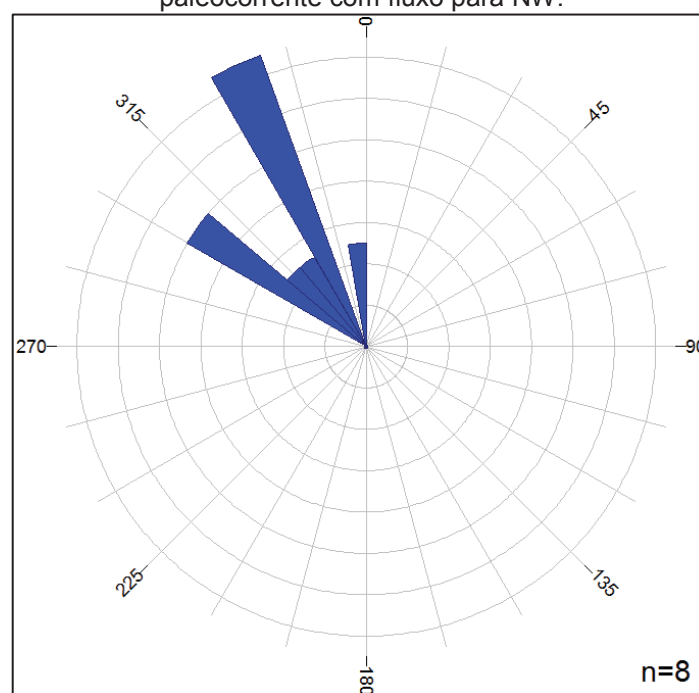
A fácies Sp foi interpretada como correspondente a depósitos de dunas subaquosas de crista reta a linguóide, formadas em regime de fluxo inferior, e esta geralmente associada à fácies St.

Figura 27 - Fácies areia com estratificação cruzada acanalada (St), plana (Sp) e baixo ângulo (Sli) no afloramento 02.



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 28 - Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies Sp, que indica paleocorrente com fluxo para NW.



Fonte: O Autor, 2015.



### 5.3.3 Areia com estratificação cruzada de baixo ângulo (Fácies Sli)

A fácies Sli (Figuras 25, 26, 27 e 29) é formada por estratos tabulares com ângulo de mergulho variando entre 1 a 3 graus, compostas por areia quartzosa, fina a média, moderadamente selecionada. A sua parte interna é composta por lâminas claras e escuras. As lâminas claras são constituídas predominantemente por areia fina e subordinadamente por areia média, e apresentam espessura variando entre 3 - 21 cm. As lâminas escuras são compostas por areia média e apresentam também restos vegetais, possuem espessura variando entre 1 - 5 mm. O contato inferior é erosivo, ocorrendo frequentemente sobre a fácies St.

As paleocorrentes dessas fácies têm sentido para NW (Figura 30). Essa fácies pode ocorrer em zonas de espraçamento ou por ondas com alta energia durante tempestades.

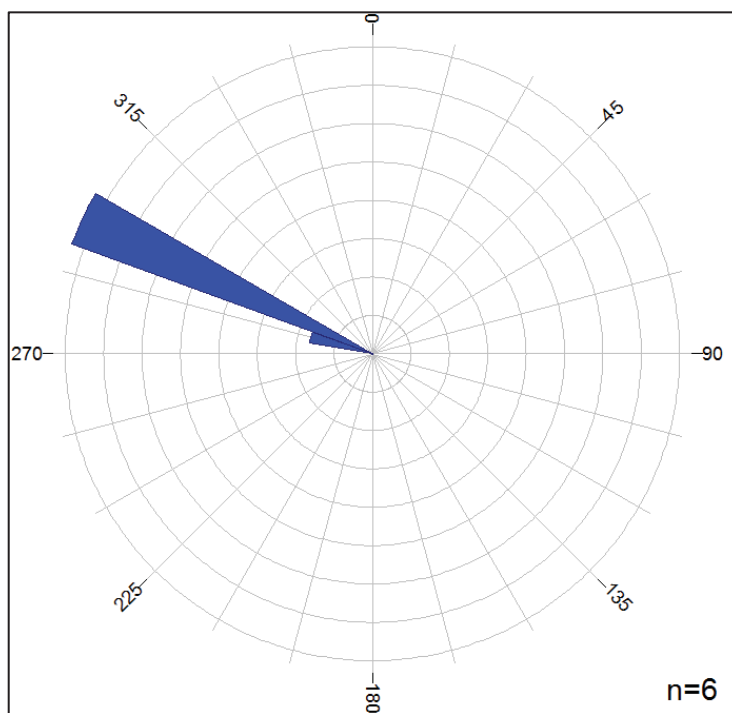
Figura 29 - Fácies areia com estratificação cruzada de baixo ângulo (Sli) no afloramento 01



Fonte: O Autor, 2015.



Figura 30 - Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies Sli, que indica paleocorrente com fluxo para NW.



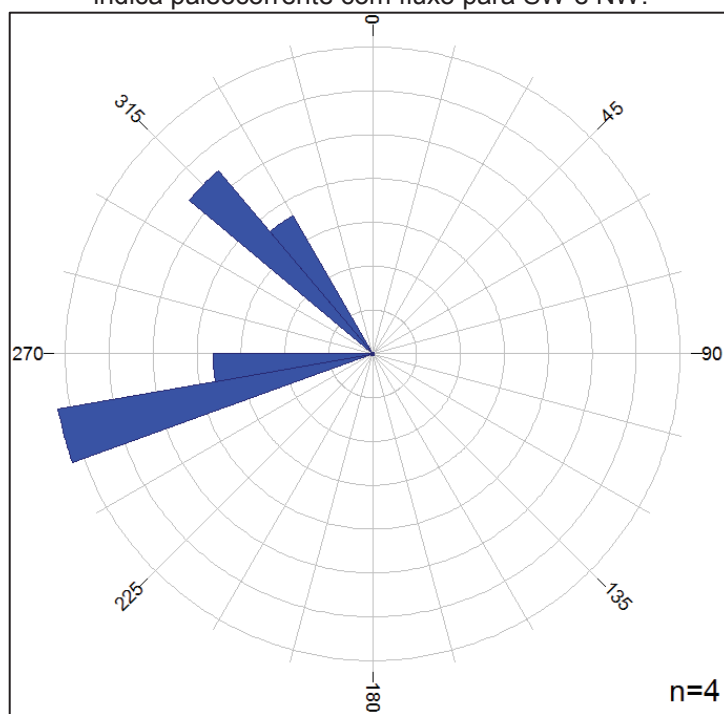
Fonte: O Autor, 2015.

#### 5.3.4 Areia com estratificação cruzada sigmóide (Fácies Ssg)

Esta fácies é constituída por sets de até 50 cm de espessura, estratos lenticulares com 10 a 50 cm de espessura (figura 26), com até 10m de extensão lateral. Composta por areia quartzosa fina a média, bem a moderadamente selecionada, ocasionalmente grânulos de quartzo; aproximadamente 5% de minerais máficos e argila. As paleocorrentes têm sentido variando entre SW e NW (Figura 31). A fácies Ssg apresenta contato inferior erosivo e ocorre abaixo da fácies St.

O processo de formação corresponde a um depósito de migração de dunas subaquosas de crista reta a sinuosa.

Figura 31 - Diagrama de roseta do sentido de mergulho das estruturas da fácies Ssg, que indica paleocorrente com fluxo para SW e NW.



Fonte: O Autor, 2015.

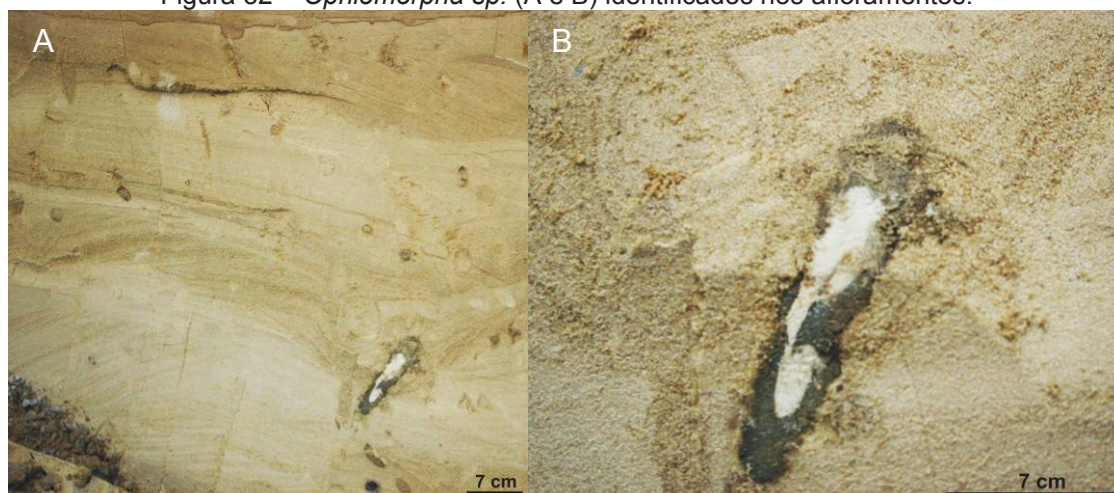
#### 5.4 ICNOFÓSSEIS

Nos afloramentos e testemunhos de sondagens foram identificados *Ophiomorpha* sp. (Figura 32 A e B), a icnofácies *scoyenia* com a forma de *skolithos* (figura 36) e estruturas de escape (Figura 33 A e B).

Os *Ophiomorpha* sp. apresentam 2 a 4 centímetros de diâmetro e ocorrem associados às fácies Sli e Sp. Os *skolithos* ocorrem na fácies Hw (Heteroolítica ondulada). As estruturas de escape apresentam dimensões variando entre 2 a 10 centímetros e estão presentes na fácies Sp, Sli e St.

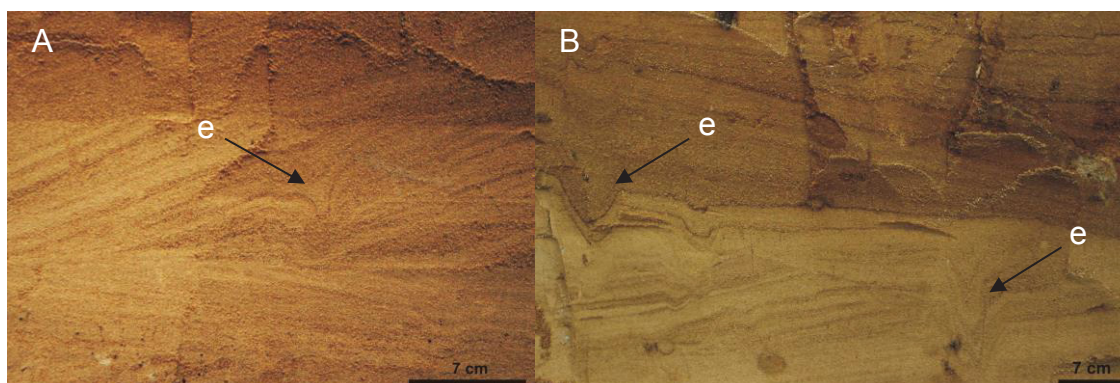
De acordo com Suguio *et al.* (1985), os tubos tem sido caracterizados como *Ophiomorpha* sp., atribuídos ao artrópode *Callichirus* sp. Suguio *et al.* (1985) consideram que os tubos de *Callichirus major* se iniciam na superfície de areia que corresponde a aproximadamente ao nível de maré baixa. Segundo (Carvalho & Fernandes 2007) a icnofácies na forma de *skolithos* e ocorre em locais com baixa energia.

Figura 32 – *Ophiomorpha* sp. (A e B) identificados nos afloramentos.



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 33 - Estruturas de escape (e) com dimensões variando entre 2 a 10 centímetros.



Fonte: O Autor, 2015.

## 5.5 FÁCIES DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

Foram descritos nos testemunhos de sondagem cinco fácies sedimentares. As fácies descritas e seus respectivos códigos são apresentados na Tabela 05.

Tabela 05 - Fácies identificadas nos testemunhos de sondagem da barreira holocênica.

Fácies	Código
Areia com estrutura maciça	Sm
Lama maciça	Fm
Heterolítica ondulada	Hw
Areia com laminação plano paralela	Sh

Fácies	Código
Areia com ondulações e laminações cruzadas	Sr
Areia com estratificação cruzada plana	Sp

Fonte: O Autor, 2015.

#### 5.5.1 Areia maciça (Fácies Sm)

A facies Sm (Figura 34) é constituída por areia fina a muito fina, essencialmente quartzosa com proporções variáveis de matéria orgânica na forma de intraclastos ou em níveis milimétricos, apresenta também traço de minerais pesados. Os cristais de quartzo são bem selecionados. Ocorrem por vezes nesta fácies detritos vegetais e *Ophiomorpha sp.*

Figura 34 – Fácies nos testemunhos de sondagem: **A)** Fácies areia fina maciça (Sm) com tubo *Ophiomorpha sp.* (o) no GVT-01; **B)** Fácies de areia muito fina com intraclastos de argila (i) no GVT-02; **C)** Fácies de areia fina com traço de minerais pesados; **D)** Fácies de areia muito fina com traço de minerais pesados no GVT-04.



Fonte: O Autor, 2015.

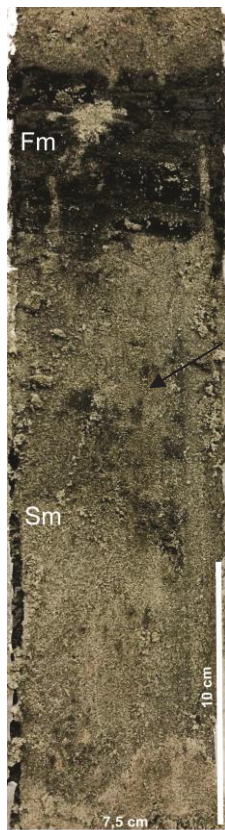


### 5.5.2 Lama maciça (Fácies Fm)

A fácies Fm (Figura 35) é composta essencialmente por argila de cor cinza escuro e apresenta subordinadamente areia fina bem selecionada.

Esta fácies ocorre no GVT-01 e está associada a períodos de calma quando houve a decantação de lama.

Figura 35 - Fácies de lama maciça (Fm) e fácies de areia fina (Sm) no GVT-01.



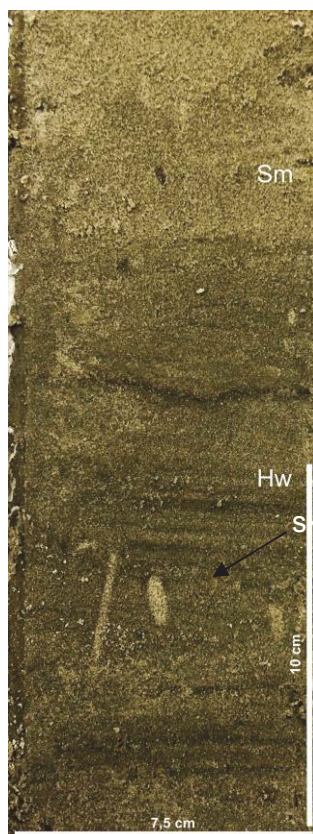
Fonte: O Autor, 2015.

### 5.5.3 Heterolítica ondulada (Fácies Hw)

A fácies Hw (Figura 36) é caracterizada pela interestratificação entre lâminas composta por lama e areia.

A fácies Hw ocorre no GVT-01 na forma de ondulações assimétricas. Esta fácies foi interpretada como formada por uma alternância de processos de fluxos trativos ou oscilatórios (areia) e decantação (lama). Foi observada nessa fácies a presença da icnofácies scoyenia na forma de *skolithos*.

Figura 36 - Fácies com interestratificação entre lama e areia fina (Hw) com *skolithos* e fácies de areia fina (Sm) no GVT-01.



Fonte: O Autor, 2015.

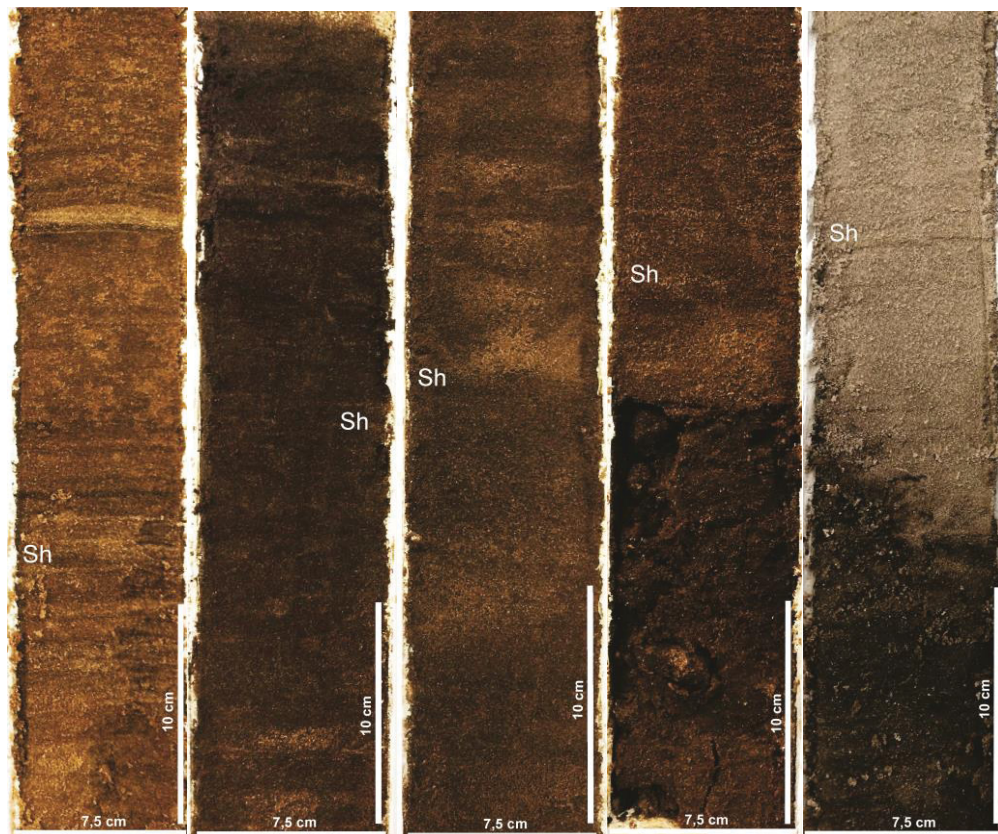
#### 5.5.4 Areia com laminação plano paralela (Fácies Sh)

A fácies Sh (Figura 37) é constituída por areia fina a grossa essencialmente quartzosa, com grãos subarredondados e moderadamente selecionados, apresenta subordinadamente detritos vegetais.

A areia fina está disposta em lâminas horizontais a sub-horizontais com espessura variando entre 1 mm a 3 mm, intercalada por níveis de areia grossa, os quais também ocorrem em lâminas. A distinção entre as fácies Sh e Sli em testemunhos de sondagem não foi possível.

Na base do GVT-02 essa fácies apresenta o predomínio da areia grossa, sendo intercalada por níveis milimétricos de areia fina. Enquanto no topo há o predomínio da areia fina, sendo intercalada por níveis milimétricos de areia grossa (Figura 38).

Figura 37 - Fácies com areia fina com laminação plano paralela (Sh).



Fonte: O Autor, 2015.



Figura 38 - Fácies descritas no testemunho de sondagem GVT-02. Na base do testemunho há predominância de lâminas com granulação média a grossa intercalada com níveis de areia fina (A). Em direção ao topo (B), (C) e (D) há gradativamente o aumento de lâminas com areia fina em relação aos níveis de areia média a grossa. No topo da sondagem (E) foram descritas as fácies Sr e Sm, as quais são compostas essencialmente por areia fina.



Fonte: O Autor, 2015.

#### 5.5.5 Areia com ondulações e laminações cruzadas (Fácies Sr)

A fácies Sr foi observada no GVT-02, sendo formada por areia muito fina, bem selecionada, com laminação cruzada, às vezes com lâminas de detritos vegetais, com ondulações assimétricas, as quais são resultantes da ação de ondas e correntes unidirecionais (Figura 38 – E).

#### 5.5.6 Areia com estratificação cruzada plana (Fácies Sp)

A fácies Sp (Figura 39) é constituída por areia média a grossa, moderadamente selecionada. Nos estratos pode-se observar estratificação cruzada formada por planos claros e escuros. Esta fácies foi interpretada como

correspondente a dunas subaquosas de crista reta a linguóide, formadas em regime de fluxo inferior.

Figura 39 - Fácies de areia média a grossa com estrutura cruzada plana.



Fonte: O Autor, 2015.

## 6. DISCUSSÃO

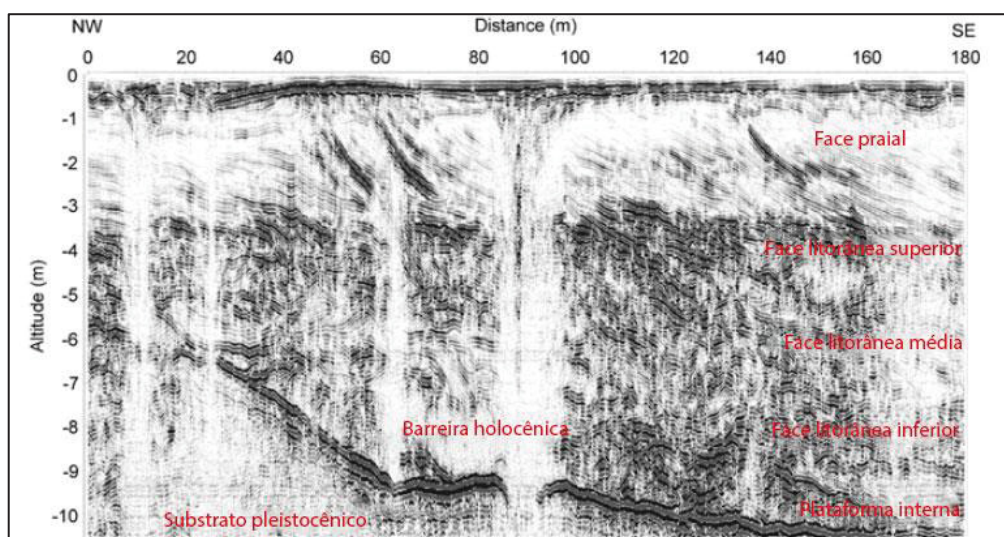
### 6.1 ESTRATIGRAFIA DA ÁREA DE ESTUDO

Através do reconhecimento das superfícies limitantes de primeira ordem, foi possível realizar um empilhamento estratigráfico para a área de estudo em unidades.

Foram definidas três unidades: inferior, intermediária e superior. As unidades intermediária e superior foram descritas com base na determinação de suas superfícies de segunda ordem, fácies descritas em afloramentos e em testemunhos de sondagem, enquanto a unidade inferior foi descrita de acordo com suas radarfácies.

As unidades identificadas correspondem aos ambientes de formação propostos no trabalho de Souza *et al.* (2012), em que foram interpretados intervalos correspondes ao substrato pleistocênico, a plataforma interna, face litorânea inferior, face litorânea média e superior, e pôr fim a face praial (Figura 40).

Figura 40 - Perfil de GPR na barreira holocênica regressiva em Praia de Leste.



Fonte: Modificado de Souza *et al.* (2012).

#### 6.1.1 Unidade inferior

A unidade inferior é lateralmente descontínua e pode ocorrer a partir de 15 m de profundidade até o limite da profundidade de aquisição de dados (20

m). Essa unidade ocorre em profundidade superior ao limite investigado por métodos diretos.

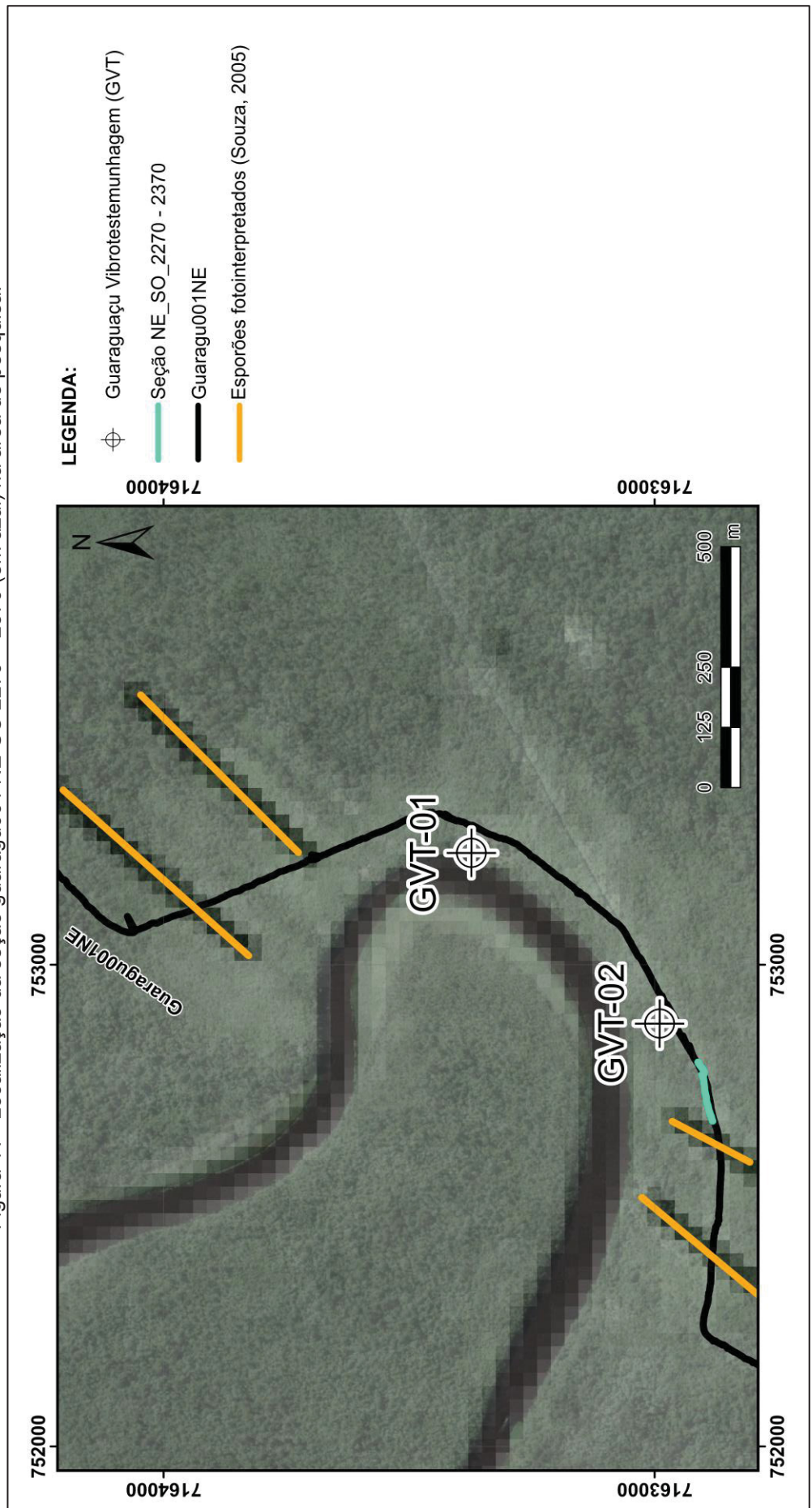
O limite superior dessa unidade é marcado pela a superfície de primeira ordem Sf1-Dc, a qual apresenta uma amplificação do sinal eletromagnético no contato com a unidade intermediária e é irregular. Os refletores presentes no interior dessa unidade apresentam uma atenuação do sinal eletromagnético. A principal radarfácies desse domínio é a Pd.

A radarfácies Pd é descontínua, sua terminação apresenta geralmente baixa amplitude. A configuração interna dessa radarfácies é paralela à subparalela. Essa radarfácies é observada na linha Guaragu\_001 (2270 – 2370) (Figura 42). A localização dessa linha na área de pesquisa é observada na Figura 41.

A unidade inferior, de acordo com estudos prévios em outros setores da planície, pode ser interpretada como a barreira pleistocênica, substrato sobre o qual a barreira holocênica se desenvolveu. Desse modo, a superfície Sf1-Dc marca o limite da sequência deposicional da barreira pleistocênica.

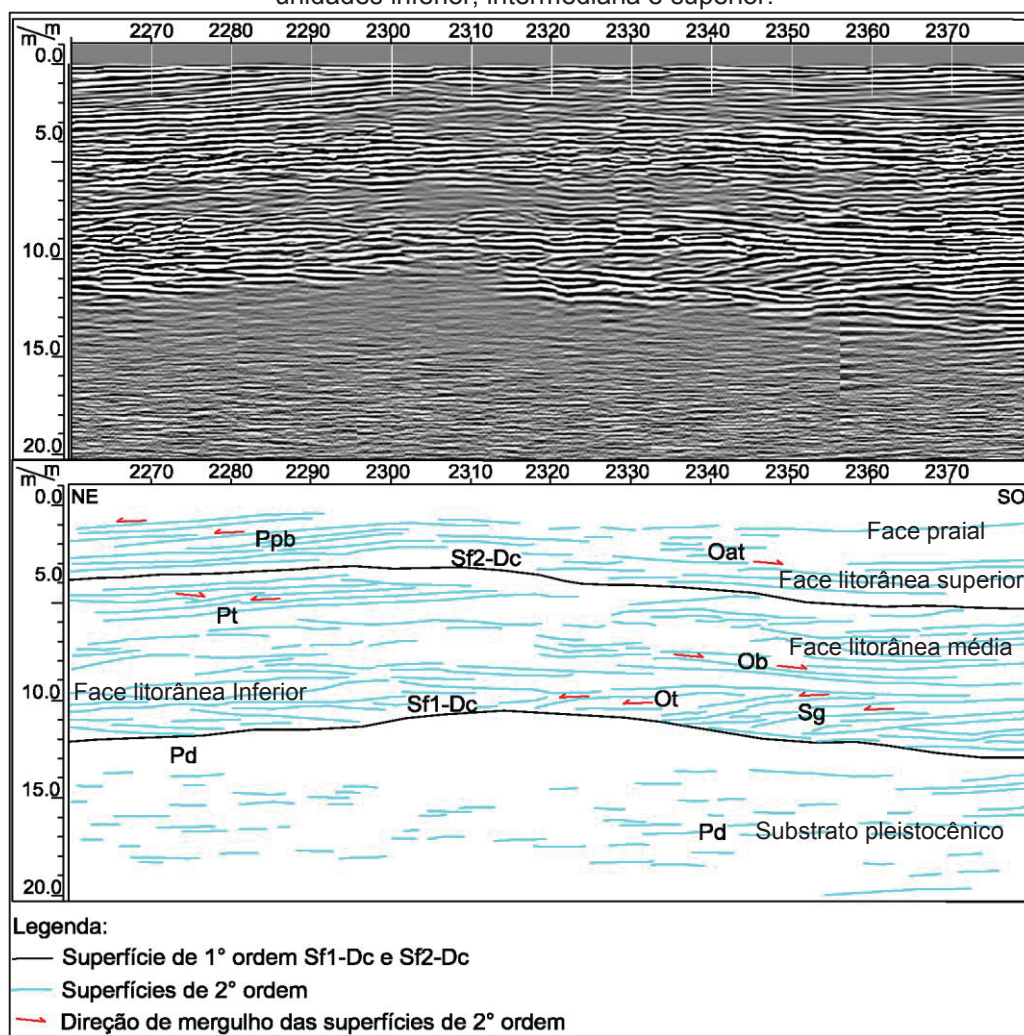


Figura 41 - Localização da seção guaragu001 NE-SO 2270 – 2370 (em azul) na área de pesquisa.



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 42 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem nas unidades inferior, intermediária e superior.



Fonte: O Autor, 2015.

### 6.1.2 Unidade intermediária

A unidade intermediária é lateralmente contínua, ocorre predominantemente a partir de 7 m até 15 m de profundidade, na ausência do domínio inferior chega a apresentar dados até 20 m.

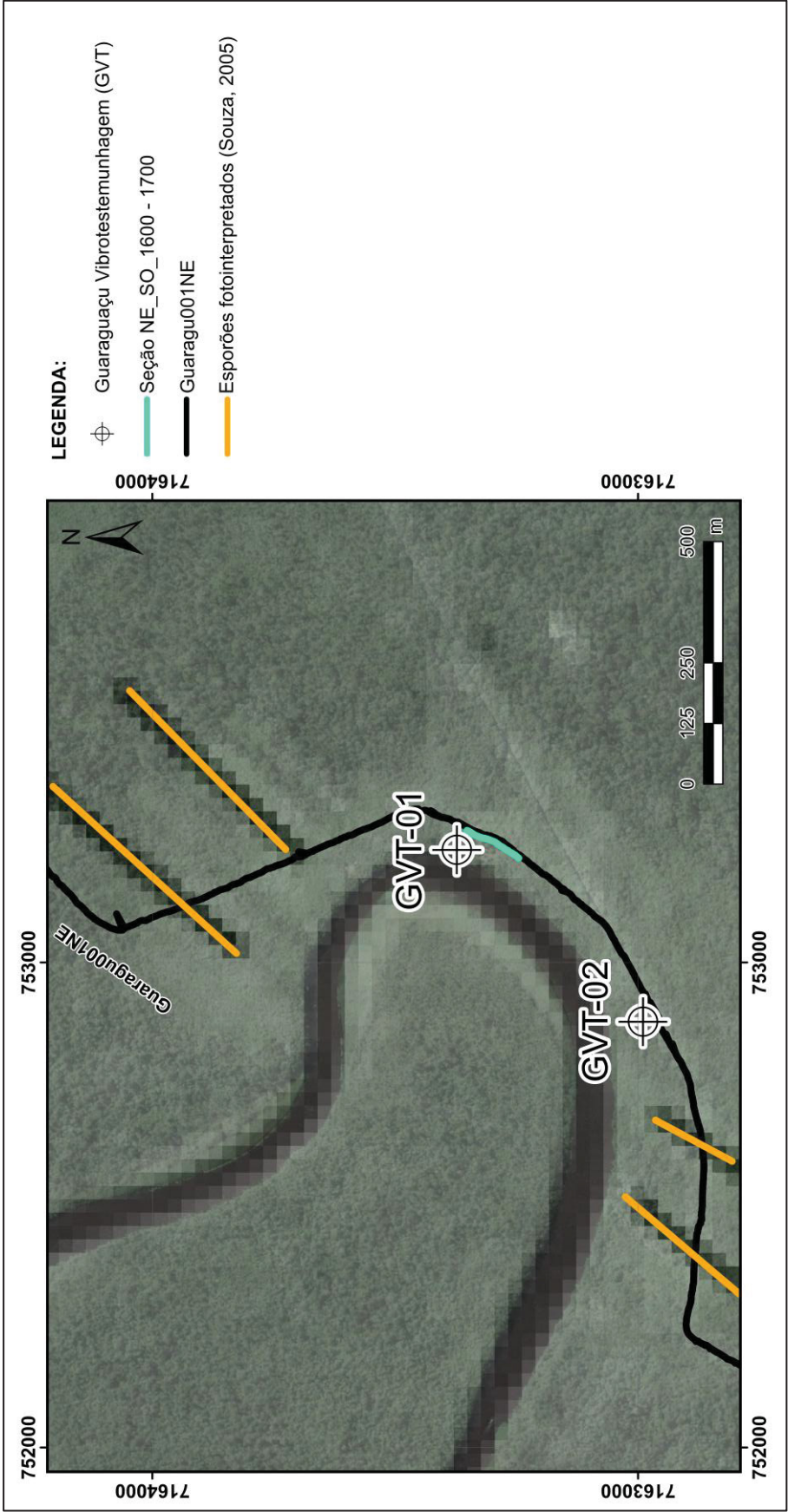
O limite inferior da unidade intermediária é marcado na base pela superfície de primeira ordem Sf1-Dc, enquanto o seu limite superior é marcado pela superfície Sf2-Dc, o qual se trata de uma superfície que marca a mudança de ambiente de face praial e face litorânea superior, para a face litorânea média.

Os padrões de reflexão encontrados nesse domínio apresentam variações quanto à amplitude do sinal eletromagnético, à continuidade lateral e ao ângulo de inclinação do limite inferior.

Foram identificadas nessa unidade sete radarfácies, denominadas Sg, Ot, Pt, Ct, Cm, Ob e Pd. O testemunho de sondagem GVT-01 interceptou a unidade intermediária, sendo correlacionada a seção de radar da linha Guaragu\_001NE (1600 – 1700), conforme observado na Figura 43.



Figura 43 - Localização da seção guaragu001 NE-SO 1600 – 1700 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-01 na área de pesquisa.



Fonte: O Autor, 2015.

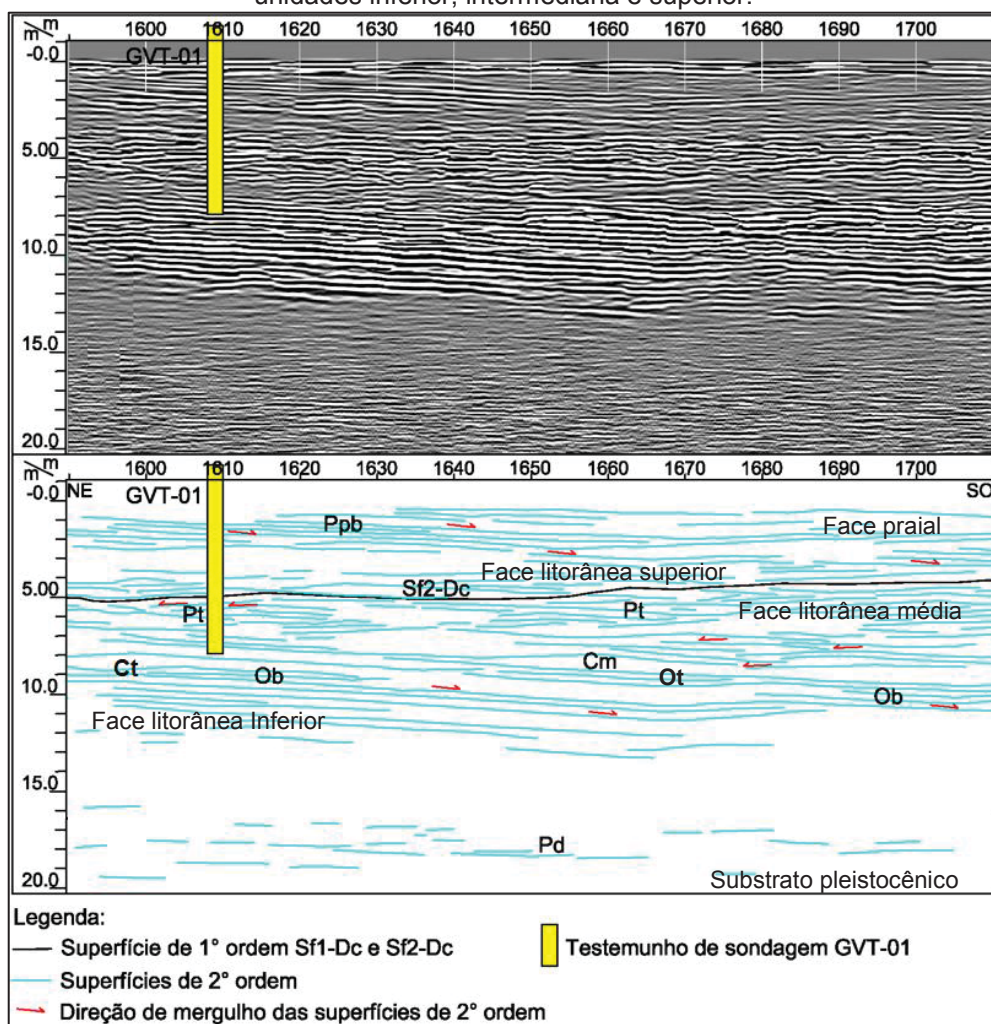
Na linha guaragu001NE (2270 – 2370) (Figura 44) foram identificados no contato com a superfície de primeira ordem Sf1-Dc os padrões Sg e Ot. O limite inferior desses padrões está em *downlap* em relação à superfície de primeira ordem Sf1-Dc. As radarfácies Sg e Ot foram interpretados como migração de barras arenosas ou esporões sobre os depósitos da barreira pleistocênica.

Acima das superfícies de radar Sg e Ot ocorre a radarfácies Ob. A radarfácies Ob apresenta uma amplificação do sinal eletromagnético e um padrão subparalelo com continuidade lateral decamétrica, a qual trunca as demais radarfácies. A continuidade lateral da radarfácies Ob é normalmente sucedida pelo padrão de radarfácies Ct e Cm.

Os padrões Ct e Cm ocorrem no intervalo entre 5 a 15 m de profundidade. Os refletores com feições convexas foram entendidos como *hummockys*. Enquanto as reflexões com feições côncavas foram interpretadas como *swaleys*. Essas estruturas estão geneticamente relacionadas (Leckie & Walker 1982) e se formam durante eventos de tempestades (Dumas & Arnott 2006). A *hummockys* são estruturas formadas pela oscilação de ondas com longo período (8 - 10 s) ou pela combinação da oscilação de ondas com fluxos unidirecionais, acima, porém próximas, ao nível de base das ondas de tempestade. Enquanto as *swaleys* podem se formar pela aggradação de estruturas *hummockys*, se preservando entre o limite das ondas de tempestade e de bom tempo (Dumas & Arnott 2006).

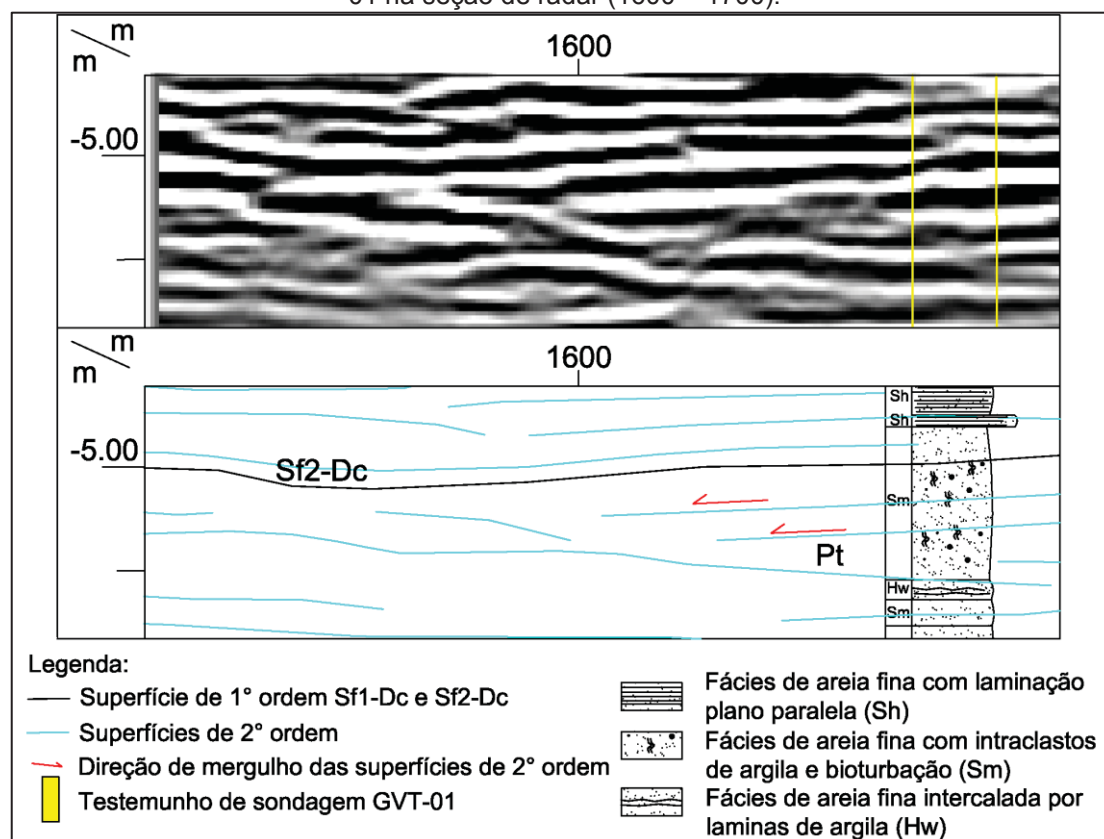
A radarfácies Pt está presente normalmente sobre as radarfácies Ct e Cm. Esse padrão foi interpretado como um depósito de dunas subaquosas de cristas angulosas a linguóide. A sondagem GVT-01 interceptou essa radarfácies na seção de radar Guaragu\_001NE (1600 – 1700) (Figura 45). Conforme observado na Figura 44, a radarfácies Pt está correlacionada a fácies Sm. Essa fácies é composta por areia fina e apresenta intraclastos de argila milimétricos. Na mesma seção não é observada a Sf1-Dc, havendo a partir de 12 m uma atenuação do sinal eletromagnético.

Figura 44 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem nas unidades inferior, intermediária e superior.



Fonte: O Autor, 2015.

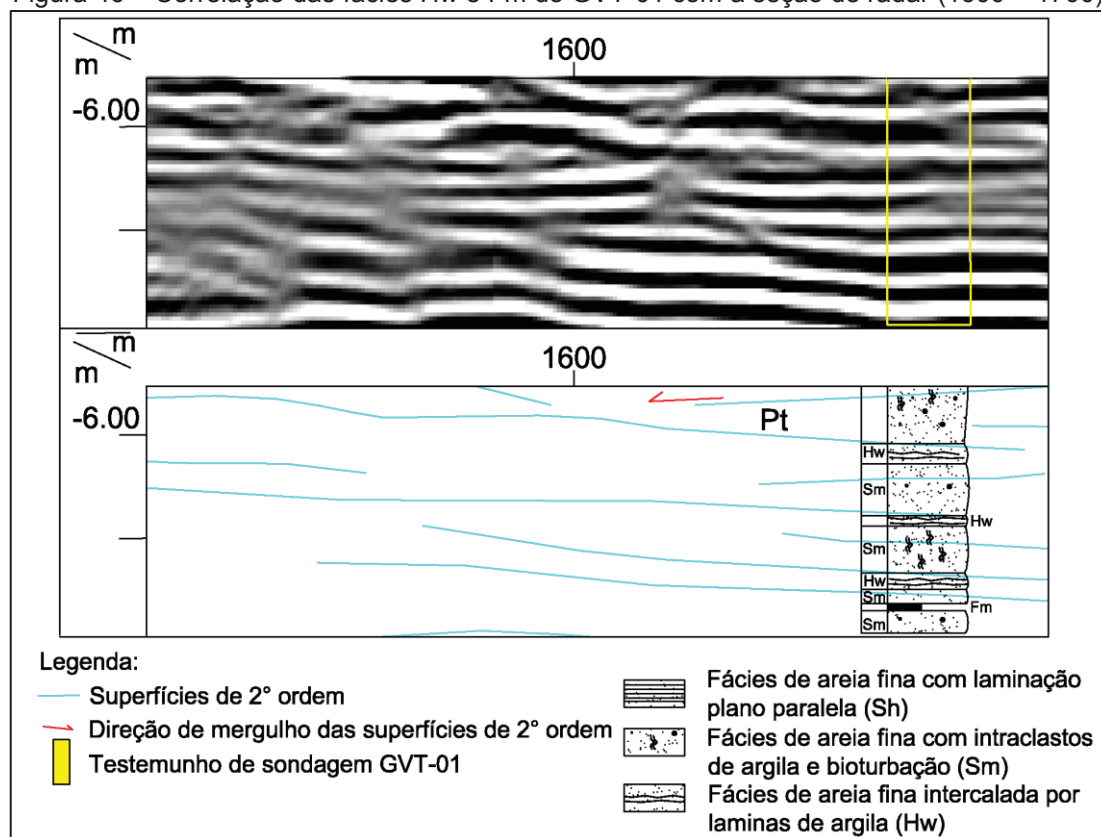
Figura 45 – Correlação da radarfácies Pt com a fácies Sm do testemunho de sondagem GVT-01 na seção de radar (1600 – 1700).



Fonte: O Autor, 2015.

Foram descritas também na sondagem GVT-01 as fácies Hw e Fm. Essas fácies apresentam maior conteúdo em argila, tendo a fácies Hw a intercalação laminar de lama e areia fina sucessivamente, enquanto a Fm apresenta maior conteúdo em lama, sendo subordinadamente composta por areia fina. A correlação dessas duas fácies com a seção de georradar pode ser visualizada na Figura 46.

Figura 46 – Correlação das fácies Hw e Fm do GVT-01 com a seção de radar (1600 – 1700).



Fonte: O Autor, 2015.

Na seção de georradar 1600 – 1700 (Figura 40), abaixo das fácies Hw e Fm, ocorre a radarfácies Ob e posteriormente há uma atenuação do sinal de GPR. Isso demonstra que nessa posição da barreira, no intervalo entre 6 e 12 metros de profundidade há uma intercalação de processos trativos (radarfácies Ob) e de decantação (fácies Fm), sendo a fácies Hw a representação dessa alternância em um ciclo menor.

A unidade intermediária é delimitada pelas duas superfícies de radar de primeira ordem (Sf1-Dc e Sf2-Dc) e corresponde a plataforma interna, face litorânea inferior e face litorânea média.

### 6.1.3 Unidade superior

A unidade superior é contínua e ocorre da superfície de levantamento dos dados de GPR até 7 m de profundidade. O limite inferior dessa unidade é definido pela superfície de primeira ordem Sf2-Dc. De acordo com o perfil de GPR interpretado por Souza *et al.* (2012) (Figura 40), esta unidade pode ser interpretada como um depósito de praia subárea – intermaré. Entretanto pelas

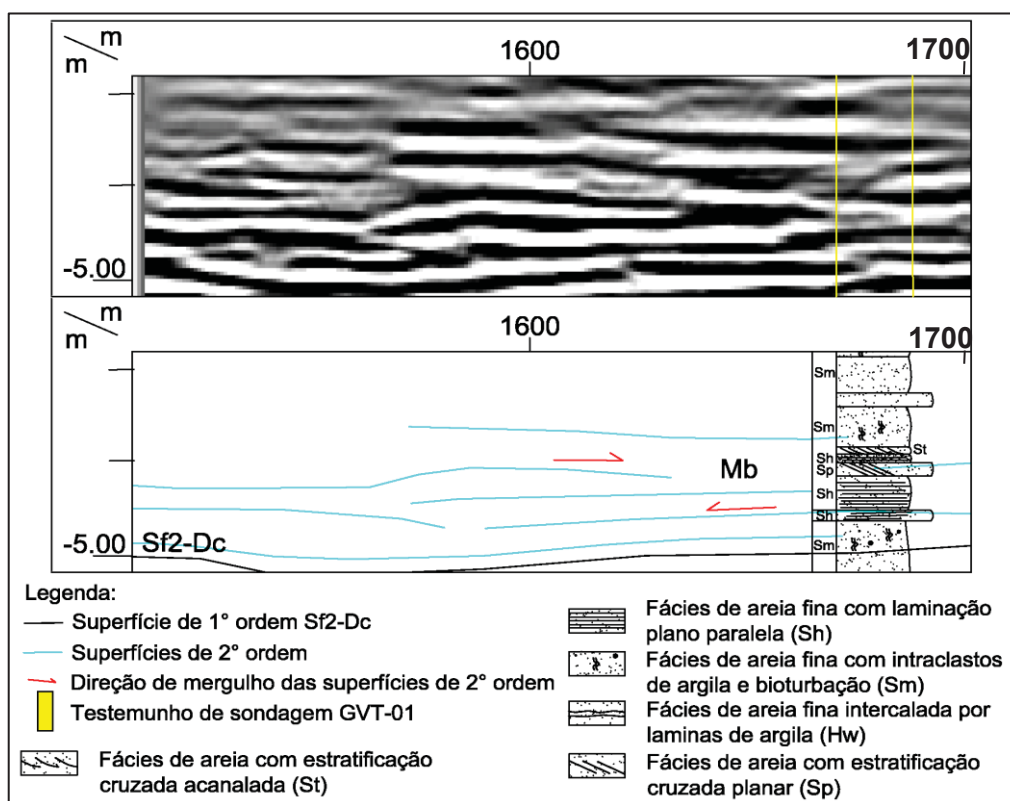


seções de georradar, afloramentos e testemunhos descritos, há também nessa unidade depósitos da face litorânea superior.

Foram identificadas na unidade superior quatro radarfácies: Mb, Oat, Ob e Ppb. Essa unidade foi também detalhada a partir de métodos diretos, através das descrições de afloramentos e dos furos de sondagem. Foram identificadas nos afloramentos descritos nas margens do rio Guaraguaçu quatro fácies: Sli, St, Sp e Ssg. Nos testemunhos de sondagem foram também identificadas quatro fácies: Sm, Sh, Sr e Sp.

A radarfácies Mb apresenta refletores com baixo ângulo de mergulho multidirecional. Essa radarfácies ocorre geralmente acima da superfície de primeira ordem Sf1-Dc, associada à passagem da unidade intermediária para a unidade superior. O padrão da radarfácies Mb foi interceptado pela sondagem GVT-01. O intervalo do testemunho que compreende a radarfácies Mb possui as fácies Sh, Sp, St e Sm (Figura 47). De acordo com a associação das fácies do testemunho é provável que a radarfácies Mb esteja associada a processos superimpostos de migração de dunas subaquosas.

Figura 47 – Correlação das fácies do GVT-01 com o padrão Mb da seção de radar (1600 – 1700).

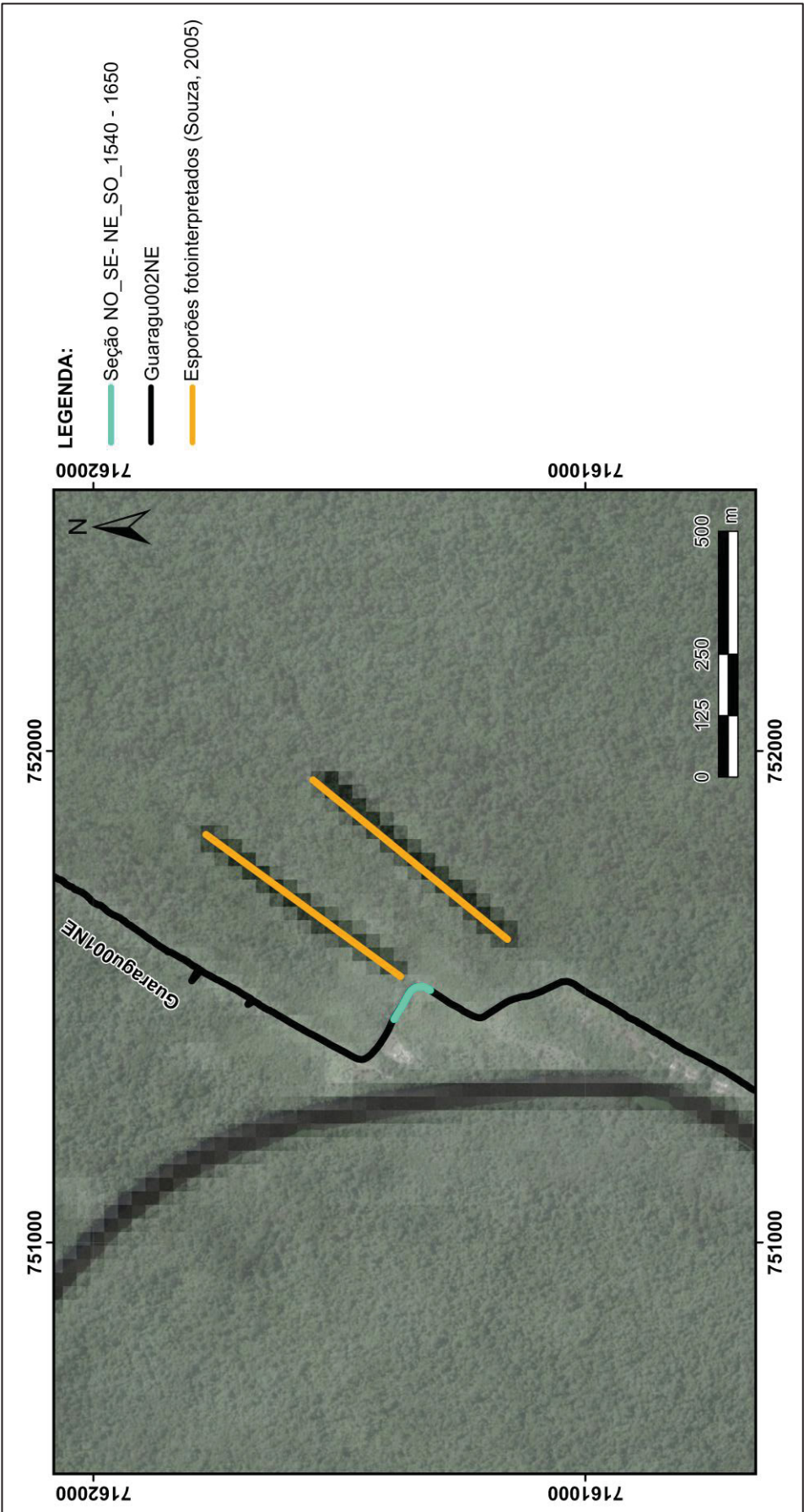


Fonte: O Autor, 2015.

A radarfácies Oat ocorre geralmente quando o sentido do levantamento é realizado em dip (NO – SE) (Figura 49). Desse modo, os refletores da radarfácies Oat apresentam forma oblíqua tangencial com mergulho de até  $15^\circ$ , progradante em direção ao mar. Quando o levantamento é realizado em strike, a radarfácies Oat passa lateralmente para Ob na unidade superior, como pode ser observado na seção guaragu\_002 NE(1540 – 1650) (Figura 48).

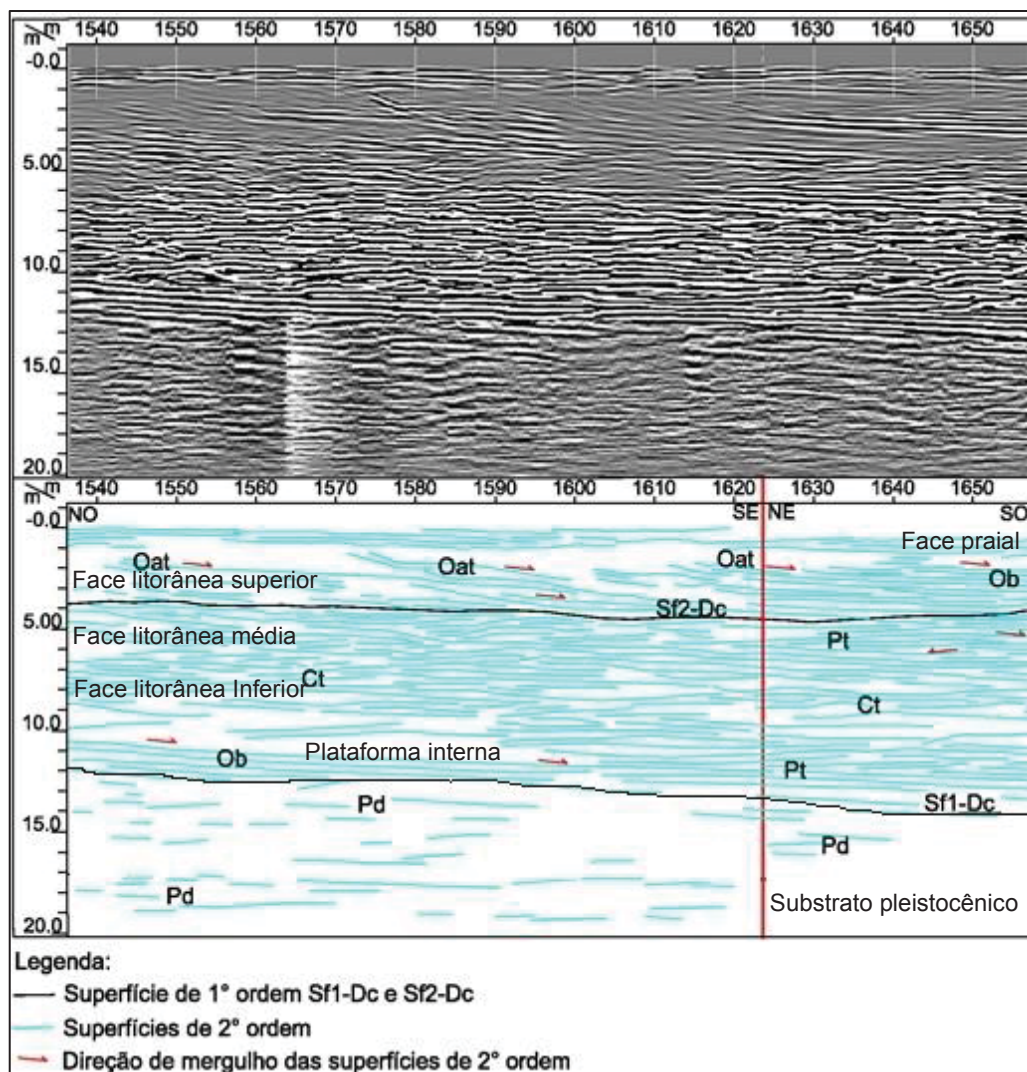


Figura 48 – Localização da seção guaragu002 NO-SE\_NE-SO 1540 – 1650 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-01 na área de pesquisa



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 49 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem da seção de radar 1540 – 1650. A barra em vermelho indica a mudança de sentido de levantamento, o qual inicia de NO-SE, passando para NE-SO.



Fonte: O Autor, 2015

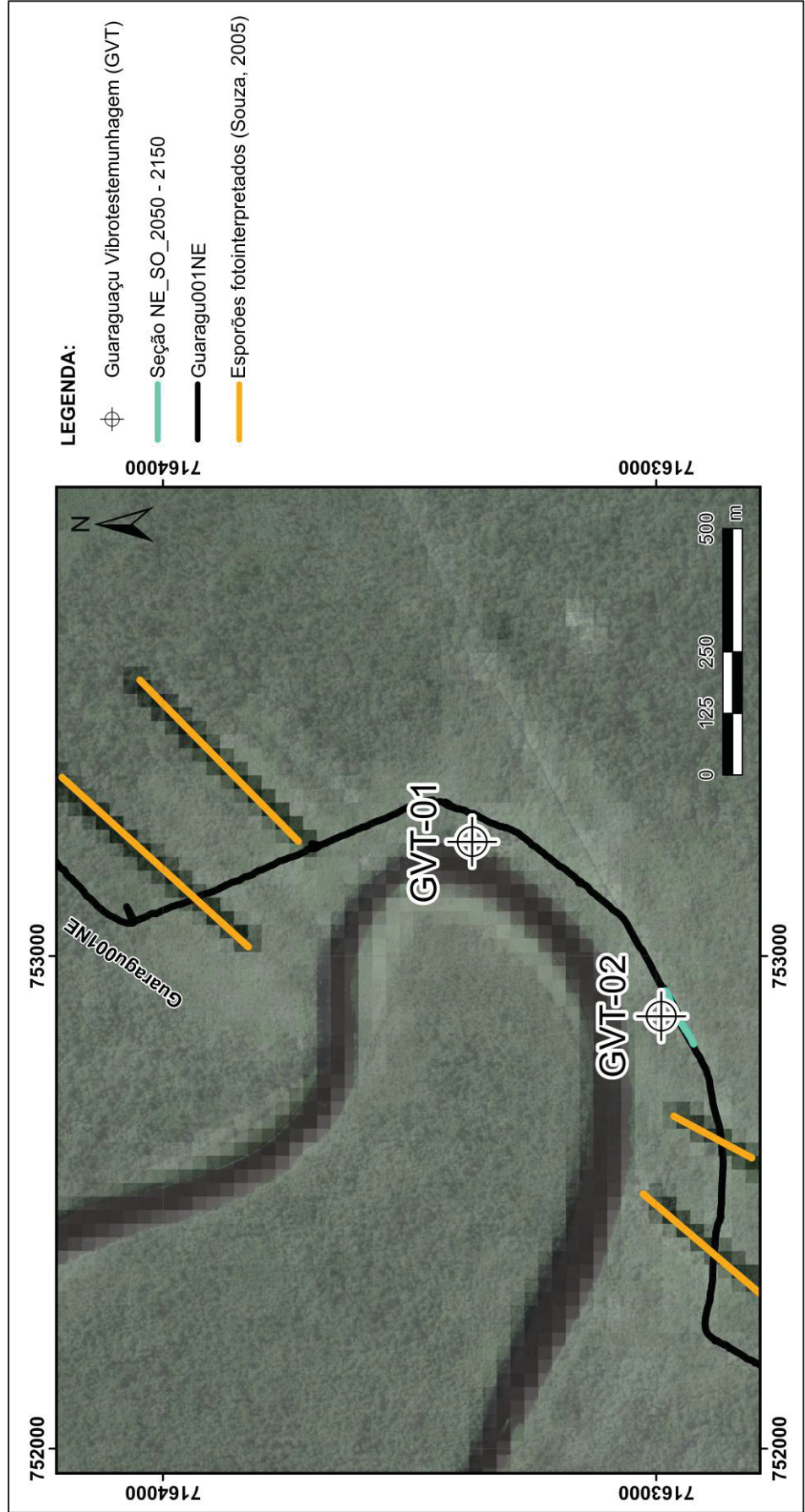
A radarfácies Ppb ocorre acima das fácies Oat, Ob e Mb. O padrão Ppb apresenta refletores subparalelos com mergulho de até 3°, com continuidade lateral decamétrica e amplitude variada.

Essa radarfácies foi interceptada pelos testemunhos de sondagem GVT-02 e GVT-04, e pelo afloramento (AF-01).

O GVT-02 foi realizado sobre a seção de radar guaragu001 NE-SO (2050 – 2150), conforme apresentado na Figura 51. A localização da seção e da sondagem pode ser observada na Figura 50.

No GVT-02 a radarfácies Ppb está correlacionada as fácies Sh, Sr e Sm e conforme observado na Figura 52.

Figura 50 - Localização da seção guaragu001 NE-SO 2050 – 2150 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-02 na área de pesquisa.



Fonte: O Autor, 2015



Figura 51 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem da seção de radar\_NE\_SO 2050 - 2150

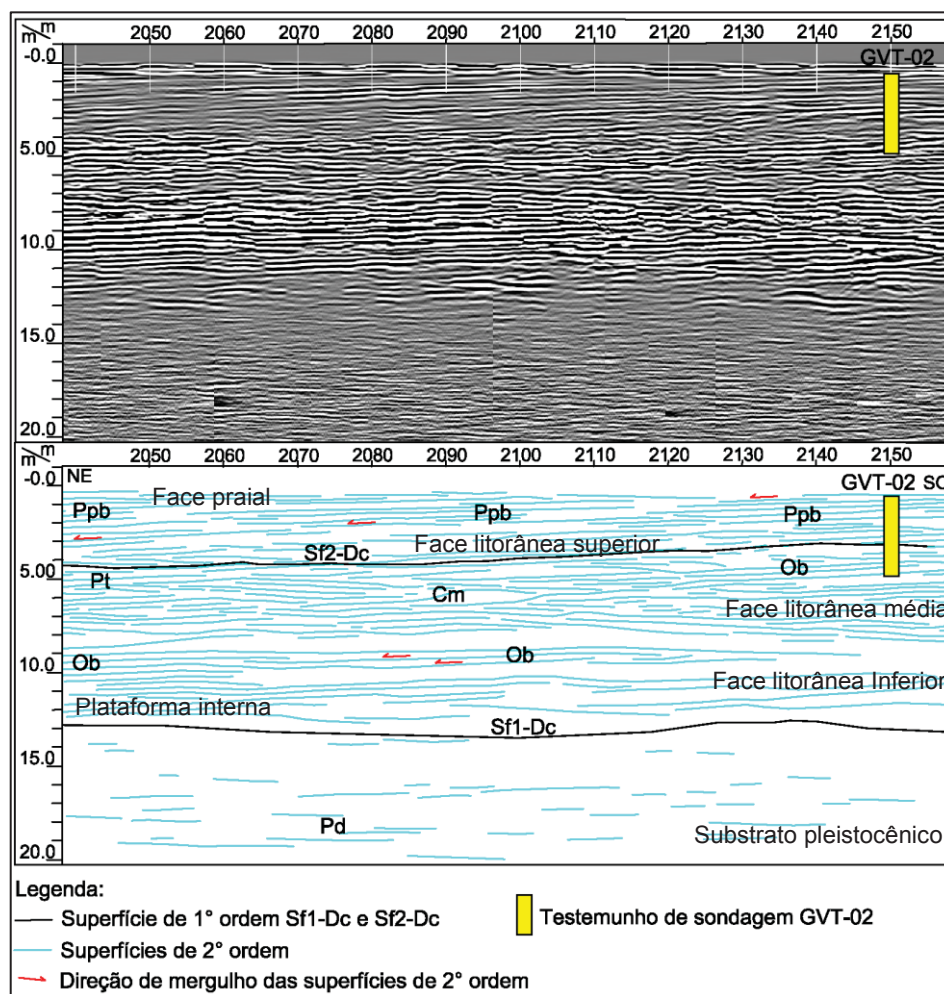
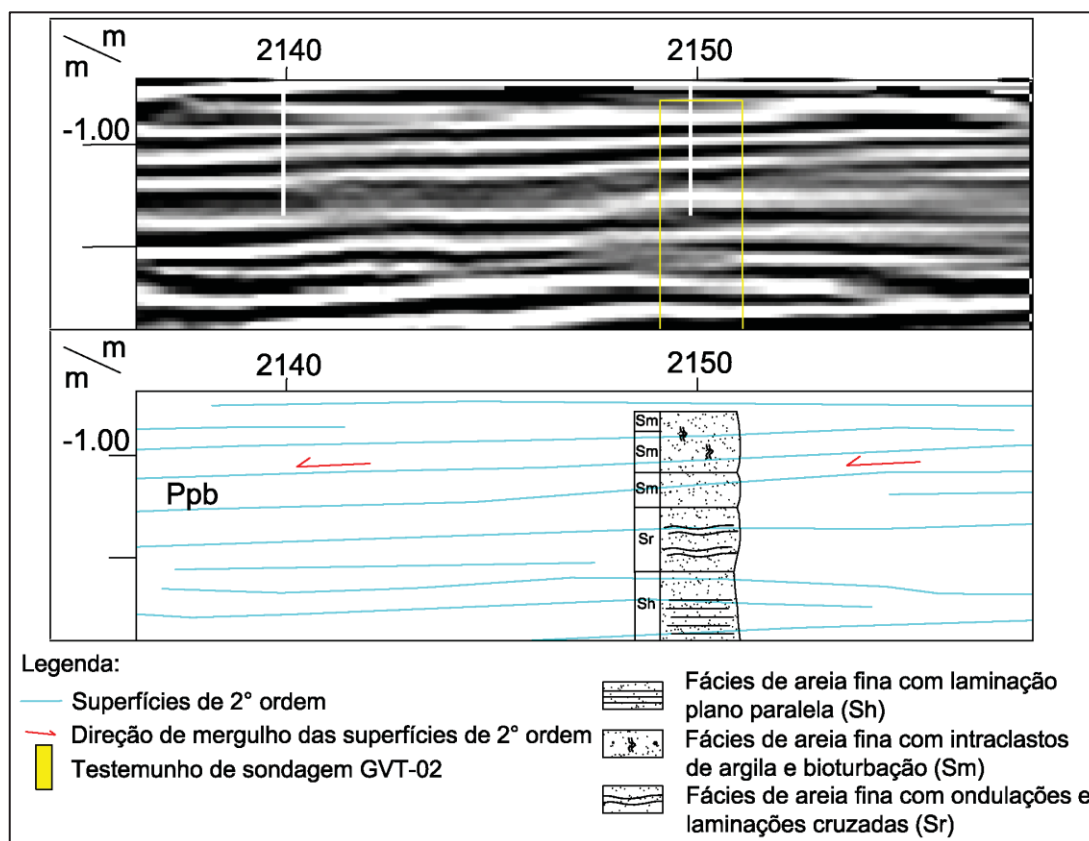


Figura 52 - Correlação das fácies do GVT-02 com o padrão Ppb da seção de radar (2050 – 2150).



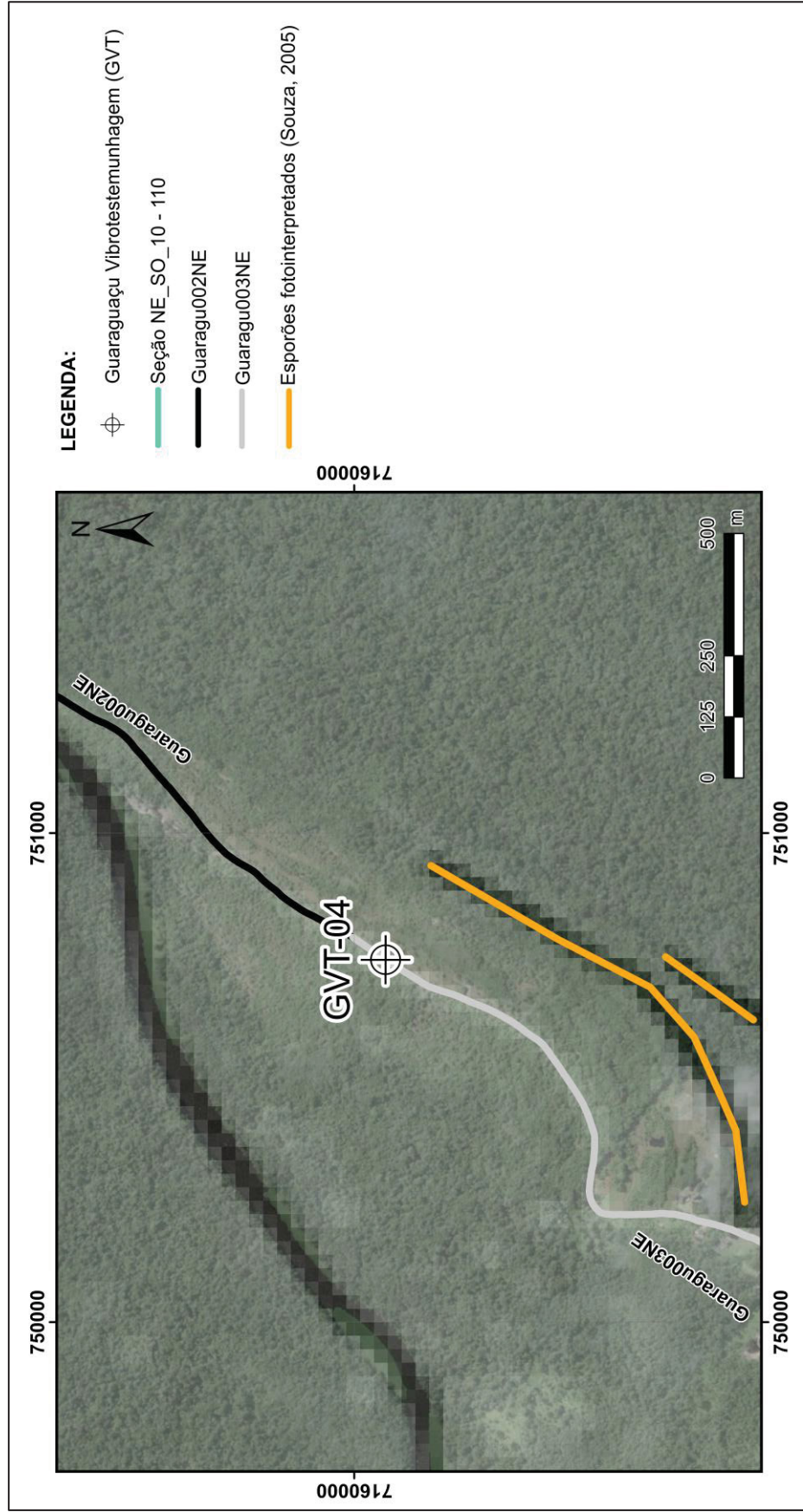
Fonte: O Autor, 2015

O GVT-04 foi realizado sobre a seção de radar guaragu003 NE-SO (10 – 110) (Figura 54). A localização da seção e da sondagem pode ser observada na Figura 53.

No GVT-04 a radarfácies Ppb corresponde as fácies Sh e Sm (Figura 55). A fácies Sh está na base do GVT-04 e são compostas por areia fina a média com coloração castanha, podendo se tratar de depósitos formados pelo preenchimento de paleocanal. A fácies Sm está acima da fácies Sh é composta por areia fina a muito fina, sendo possivelmente dunas frontais na praia subárea.

Nesse setor, de acordo com a seção de radar NE-SO (10 – 110), a radarfácies Ppb apresenta migração lateral tanto para NE, quanto para SO.

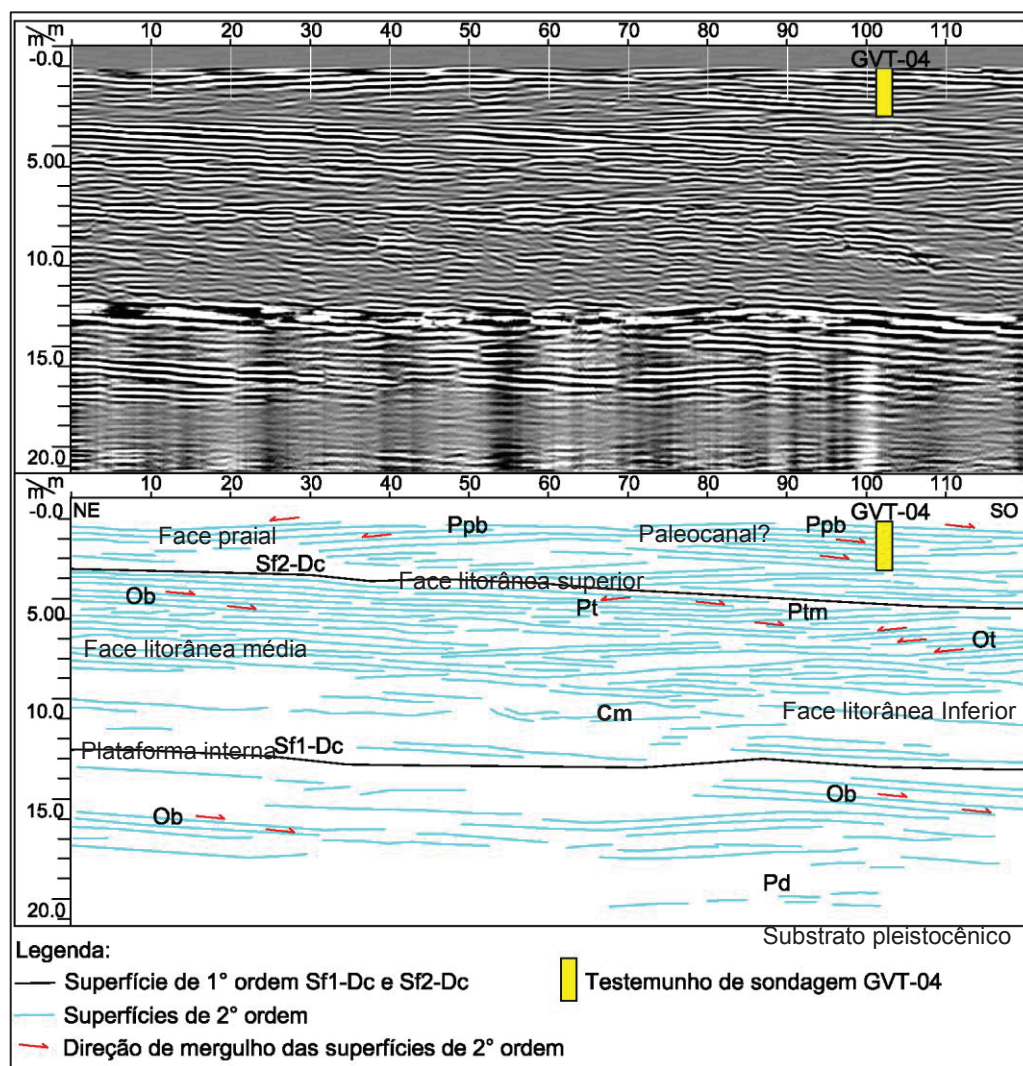
Figura 53 - Localização da seção guaragu003 NE-SO 10 – 110 e da sondagem com vibrotestemunhador GVT-04 na área de pesquisa.



Fonte: O Autor, 2015.

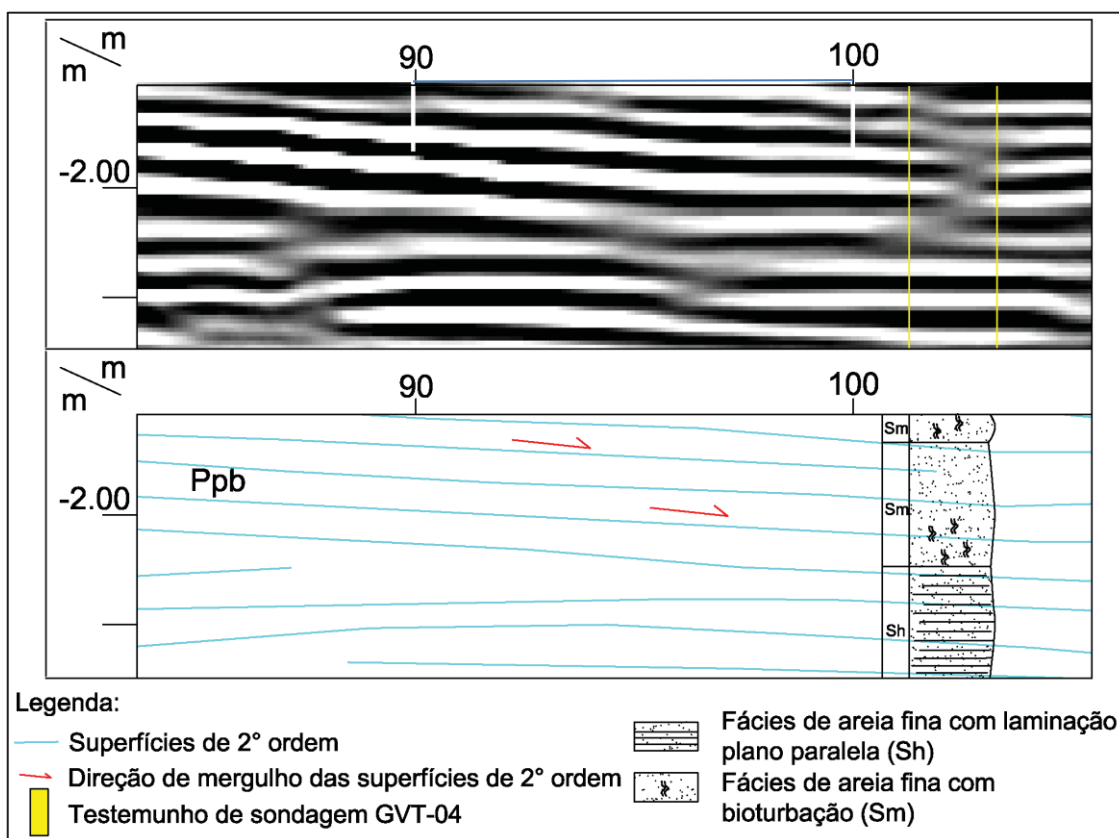


Figura 54 - Radargrama com traçado das superfícies de primeira e segunda ordem da seção de radar\_NE\_SO 10 – 110.



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 55 - Correlação das fácies do GVT-04 com o padrão Ppb da seção de radar (10 – 110).



Fonte: O Autor, 2015.

No afloramento 01 a radarfácies Ppb está correlacionada com as fácies St, Sp e Sli. Souza (2005) atribuiu à associação dessas fácies a praia subaérea, podendo também ocorrer na face litorânea superior.

O padrão Ppb, de acordo com os dados diretos e indiretos pode ter sido formado pelo preenchimento de unidades geológicas associadas como paleolagunas, paleoestuários e paleodesembocaduras, e ou a partir da formação de esporões na face praial e na face litorânea superior.

A migração e a construção lateral dos esporões são resultantes da i) deriva longitudinal para sudoeste, ou ii) pelo bloqueio da deriva longitudinal predominante:

#### i) Deriva longitudinal para sudoeste

Souza (2005) identificou em fotografia aérea, da planície costeira paranaense (figura 56), cordões recurvados que sugeriam sentido de migração de esporões para NE, coincidente com o sentido preferencial da deriva longitudinal atual. Entretanto, identificou também feições reencurvadas para SW,

as quais foram interpretadas como esporões invertidos em relação à deriva longitudinal atual.

Figura 56 – Foto aérea de 1970 escala 1:70.000 da planície centro-sul paranaense, mostrando as feições recurvadas para sudoeste e para nordeste.



Fonte: Souza, 2005.

Segundo o modelo proposto por Souza (2000), durante a evolução da barreira holocênica houve o crescimento de esporões tanto para nordeste, quanto para sudoeste. Portanto, pode ter ocorrido a formação de esporões para nordeste pela passagem de frentes frias, durante esses períodos as ondas predominantes são provenientes do quadrante S. Enquanto a formação dos esporões invertidos sugere que durante o Holoceno, segundo Mihály & Angulo (2002), tenha ocorrido épocas prolongadas de ausência dos ventos provenientes do quadrante sul, assim, as ondas oceânicas predominantes seriam de ENE, induzidas por ventos associados ao Anticilone do Atlântico Sul.

## ii) Bloqueio do sentido de deriva longitudinal predominante

Dentre as atuais feições da costa paranaense, o Mar de Ararapira apresenta crescimento lateral de esporão para sudoeste (Figura 57).

O esporão arenoso que o separa do Oceano Atlântico, conhecido como esporão do Ararapira, ou Restinga do Ararapira, apresenta comprimento em torno de 18 km, largura máxima de aproximadamente 800 m e mínima de aproximadamente 20 m (Angulo *et al.* 2009). Este esporão está a aproximadamente 55 km da área de pesquisa.



Figura 57 – Esporão arenoso do Ararapira com sua extremidade arqueada fotointerpretada. Imagem de satélite: Google Earth® 2013.



Fonte: O Autor, 2015.



De acordo com Davis Jr. & Fitzgerald (2008) o fluxo de maré no sentido do continente remobiliza a areia depositada no canal pela ação das ondas, acumulando-a na forma de um delta de maré enchente. O mesmo processo ocorre quando o fluxo está no sentido oposto e dá origem ao delta de maré vazante. Ambos podem se desenvolver a ponto de perturbar a incidência de ondas (Carter, 1988).

Segundo Tessler & Mahiques (1993), o crescimento lateral do esporão do Ararapira para sudoeste se deve ao bloqueio da deriva longitudinal predominante para nordeste pelo delta de maré vazante.

Esse bloqueio seria causado pelo efeito molhe hidráulico do fluxo da corrente vazante (Mihály & Angulo 2002). Desse modo, predominaria a direção secundária da deriva longitudinal para sudoeste.

Portanto, o padrão Ppb com sentido para sudoeste pode estar relacionado ao crescimento de esporões devido ao bloqueio do sentido da deriva predominante por um delta de maré vazante, na desembocadura de um canal de maré. Desse modo, pode ter havido a predominância da deriva secundária, cujo sentido era para sudoeste.

## 6.2 INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL

Com o intuito de realizar a correlação das fácies descritas com os ambientes atuais, foram determinadas as paleoprofundidades em que essas fácies se formaram, para isso foram considerados a idade de deposição da barreira e o paleonível do mar na região nesse período (Figura 58).

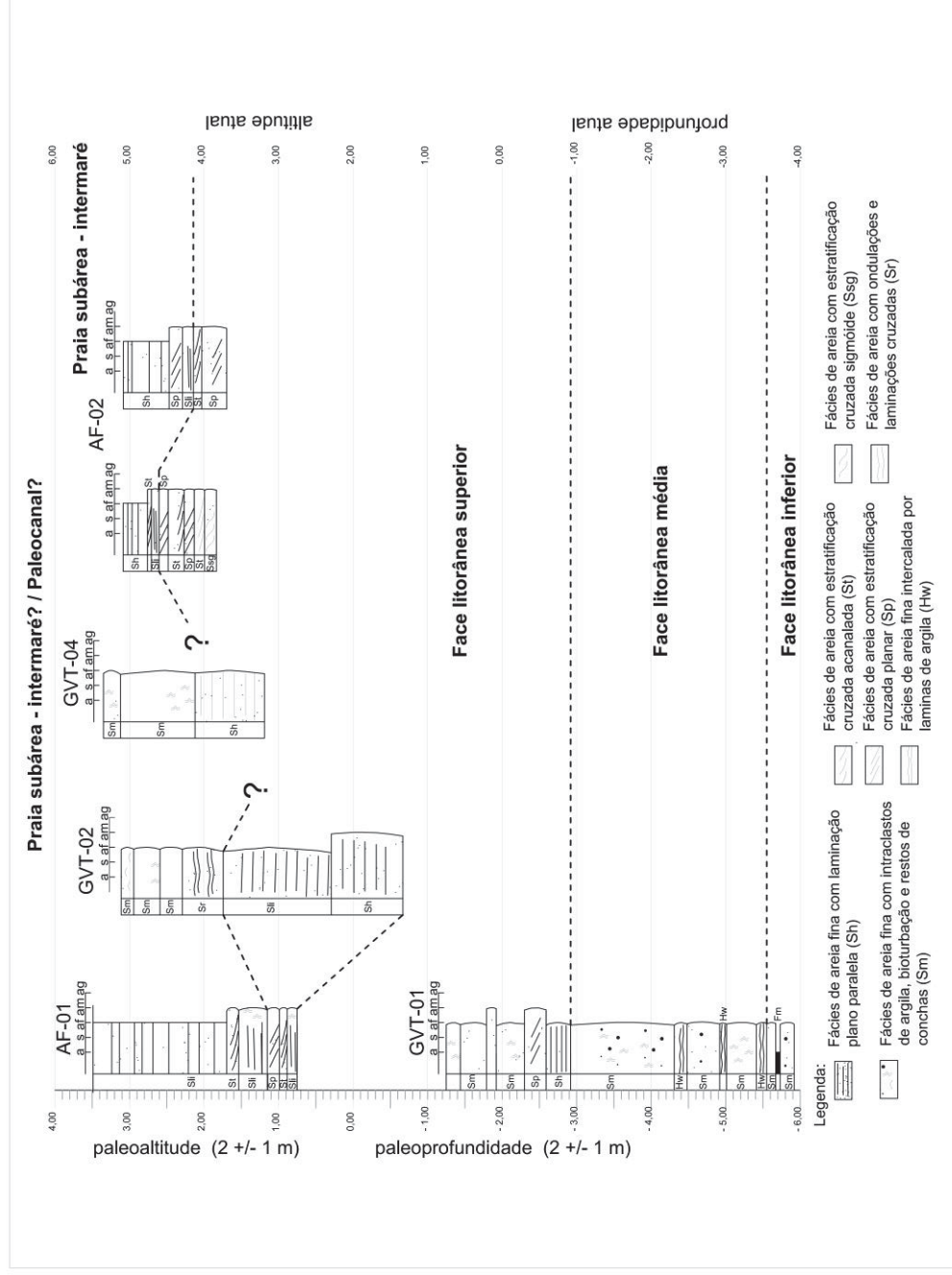
A partir das datações realizadas por Souza (2005) pelo método  $^{14}\text{C}$  da barreira holocênica, foi elaborado um modelo da distribuição das isócronas na barreira. Portanto, segundo o modelo, o início da deposição da barreira holocênica deve ter idade superior a 4.200 anos. De acordo com Angulo *et al.* (2006), o paleonível do mar na região neste período, estaria em  $2 \pm 1$  m acima do nível do mar atual.

Para inferir o paleonível marinho, foi determinado como indicador espaço temporal, o contato entre as fácies St e Sli. Segundo Angulo & Souza (2014), no Estado do Paraná o contato entre a fácies de areia com estratificação cruzada acanalada (St) e a fácies de areia com estratificação cruzada de baixo ângulo

(Sli) corresponde ao topo da face litorânea superior e a base da face praial, o que se localiza próximo ao nível médio de maré baixa. Desse modo, é possível estimar o paleonível marinho das fácies formadas durante a formação das planícies costeiras.

Portanto, de acordo com os critérios estabelecidos foram determinadas três associações denominadas de acordo com o ambiente de formação: face litorânea média, face litorânea superior e face praial. Segundo a estratigrafia proposta para a área de estudo, o substrato pleistocênico corresponde a unidade inferior. A plataforma interna, a face litorânea inferior e a face litorânea média correspondem à unidade intermediária. Enquanto a face litorânea superior e a face praial correspondem à unidade superior.

Figura 58 - Distribuição dos perfis dos afloramentos e das sondagens com vibrotestemunhador, com a profundidade e a paleoprofundidade das associações de fácies da barreira holocênica do setor estudado



### 6.2.1 Face litorânea inferior

A associação de fácies da face litorânea inferior foi interceptada pela sondagem GVT-01 entre -5,55 e -5,93 m de paleoprofundidade. Nessa associação foram descritas fácies de areia fina com intraclastos (Sm), intercalada com lama (Fm). Esta associação indica predomínio de processos de decantação, com pouco transporte, devido à mobilização de detritos vegetais arredondados sobre as fácies arenosas, os quais foram denominados intraclastos.

### 6.2.2 Face litorânea média

A associação de fácies da face litorânea média foi interceptada pela sondagem GVT-01 entre -2,91 e -5,00 m de paleoprofundidade. Esta associação é formada pela intercalação de níveis de areia fina bioturbadas com intraclastos de argila (Sm) e areias e lama em acamamento *wavy* (Hw). Nessa associação ocorrem nas fácies arenosas detritos vegetais arredondados, evidenciando transporte devido a fluxos trativos. Enquanto a lama em acamamento em *wavy* na fácies Hw, indica que houve decantação. Portanto, nessa associação há o predomínio de fluxos oscilatórios e trativos de alto regime, ocasionados por eventos de tempestades, alternados por períodos de calmaria.

### 6.2.3 Face litorânea superior

A associação de fácies da face litorânea superior foi interceptada pela sondagem GVT-01 entre 2,60 de paleoaltitude e -2,91 m de paleoprofundidade. A porção inferior dessa associação é composta por fácies arenosas com lâminas horizontais a sub-horizontais (Sh), areia com estratificação cruzada plana (Sp) e areia fina bioturbada (Sm).

A fácies Sh pode ter sido formada a partir de fluxos trativos de regime superior, enquanto a fácies Sp foi formada por fluxos trativos de regime inferior. De acordo com as fácies descritas nessa associação, há o predomínio de fluxo trativos de regime superior, e subordinadamente ocorrem fluxos trativos de regime inferior.

A porção superior é composta pelas fácies Sp, St, Sh, Sm e Ssg. As fácies dessa associação são arenosas e geralmente apresentam bioturbação associada à *Ophiomorpha* sp. As paleocorrentes das fácies Sp e St apresentam direções predominantes para NW, enquanto a fácies Ssg apresenta direção preferencial para SW.

Segundo Souza *et al.* (2012) esta associação é formada por correntes tratativas de regime inferior, geradas por ondas na zona de arrebentação e surfe com a presença de bancos de areia e canais.

De acordo, com o setor da planície costeira paranaense em que foram descritas as fácies acima, e em função das correlações e interpretações realizadas a partir das seções de georradar, esse ambiente pode ter se formado na construção de esporões e ou no preenchimento de paleocanais.

#### 6.2.4 Face praial/Paleocanal

A associação de fácies da face praial foi interceptada pelo GVT-01, GVT-02 e GVT-04, sendo descrita também no AF-01 e no AF-02.

Esta associação ocorre entre 1,15 e 3,49 m de paleopropriedade, sendo formada por fácies arenosas Sli, Sp, Sh, Sr e Sm.

Nesta associação há o predomínio da estratificação cruzada de baixo ângulo (Sli), a qual nas sondagens GVT-02 e GVT-04 pode se tratar da fácies Sh. Esta estratificação ocorre em contato erosivo geralmente sobre a fácies Sp.

A fácies Sli é correspondente a fluxos tratativos de regime superior, relacionados ao espraiamento das ondas sobre a face praial, enquanto as fácies Sp de pequeno porte e as fácies Sr podem ter sido formadas em pequenos canais da face praial. A fácies Sm interceptada pelo GVT-04 é composta por areia fina a muito fina e está localizada sobre as fácies Sh e podem ser correspondentes ao preenchimento de paleocanais.



## 7. CONCLUSÃO

Na unidade superior da seção de georradar foram verificadas a existência de depósitos com sentido de mergulho para nordeste e para sudoeste, os quais foram detalhados a partir da descrição de vibrotestemunhagem e afloramentos.

A formação desses depósitos no início da deposição da barreira holocênica pode estar associada a dois processos i) a ação da deriva longitudinal, formando esporões nesse setor da barreira holocênica com acreção lateral para sudoeste, devido a inversão da deriva litorânea ou a permanência da deriva secundária, em momentos em que predominou os ventos do quadrante sul. A formação de esporões para sudoeste também pode estar associada ao bloqueio do sentido da deriva predominante por um delta de maré vazante, na desembocadura de um canal de maré, desse modo, havendo a predominância da deriva secundária, ii) Depósitos de preenchimento de ambientes geológicos associados, como paleolagunas, paleoestuários e paleodesembocaduras.

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O método GPR correlacionado com dados diretos produziu dados satisfatórios para alcançar os objetivos propostos nesse estudo.

Para a continuidade da pesquisa sugere-se realizar um levantamento tridimensional com o georradar sobre as estruturas identificadas, além de sondagens com vibrotestemunhador, e datações C14, com o objetivo de refinar os dados indiretos e contribuir para o entendimento do modelo de evolução do início da formação da barreira holocênica, haja vista que somente com a determinação das idades dos depósitos da face praial e da face litorânea superior será possível também caracterizar se os depósitos estudados se tratam do início da deposição da barreira holocênica, ou apenas podem ser mais jovens, oriundos da deposição fluvio-estuarina.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, P. R. O. 2005. Interpretação de dados de GPR com base na hierarquização de superfícies limitantes e na adaptação de critérios sismoestratigráficos. Dissertação de mestrado. Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, p. 31-65.
- ANGULO R.J. 1992. Geologia da planície costeira do Estado do Paraná. 334 f. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ANGULO R.J. 1993. Variações na configuração da linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, v. 41, p. 52-72.
- ANGULO R.J. 2004. Mapa do Cenozoico do litoral do Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, v. 55, p. 25-42.
- ANGULO R.J.; LESSA G.C.; SOUZA M.C. 2006. A Critical Review of Mid- to Late Holocene Sea-level Fluctuations on the Eastern Brazilian Coastline. Quaternary Science Reviews, v. 25, p. 486-506.
- ANGULO, R.J.; LESSA, G.C.; SOUZA, M.C. 2009. The Holocene barrier systems of Paranaguá and northern Santa Catarina coasts, Southern Brazil. Lecture Notes in Earth Sciences. Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil, p. 135–176.
- ANGULO R.J.; SOUZA M.C. 2014. Revisão conceitual de indicadores costeiros de paleoníveis marinhos quaternários no Brasil. Quaternary Science Reviews, v. 05, n. 02, p. 01-32.
- BECKER J. E. G. 2012. Análise estratigráfica da barreira costeira de Guaratuba, PR. 43 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BIGARELLA J.J. 1946. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. Arquivos de Biologia e Tecnologia, v. 1, p. 75–11.

BIGARELLA J.J.; BECKER R.D.; MATOS D.J.; WERNER A. 1978. A Serra do Mar e a Porção Oriental do Estado do Paraná. Secretaria de Estado do Planejamento, Governo do Paraná.

BOGGS Jr., SAM. 2006. Principles of sedimentology and stratigraphy. 4th ed. – Pearson Prentice Hall.

BRANDINI, F.P. 1990. Hydrography and characteristics of the phytoplankton in shelf and oceanic waters off southeastern Brazil during winter (July/August 1982) and summer (February/ March 1984) Hydrobiology, Holland, v.196,n. 2, p.111-148.

CARTER, R. W. G. 1988. Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines. London, Academic Press. p. 99 - 134.

CARVALHO I. S.; FERNANDES A. C. S. 2007. Icnologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Série Textos n. 3.

DALRYMPLE, W.R. 2010. Interpreting sedimentary successions: Facies, Facies Analysis and Facies Models, In Facies Models 4. (Edis. Noel P. James & Robert W. Dalrymple). Department of Geological Sciences and Geological Engineering Queen's University, Canada.

DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, v. 37, p. 531-551.

DAVIS, JR. A. R.; FITZGERALD, D. M. 2008. Beaches and Coasts. Blackwell Publishing.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. 2004. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press. New York.

DILLENBURG S.R.; HESP P.A. 2009. Coastal Barriers – An Introduction. Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil Lecture Notes in Earth Sciences. Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil, 107. Springer- Verlag, Berlin, p. 135 -176.

DUMAS S.; ARNOTT R.W.C. 2006. Origin of hummocky and swaley cross-stratification – The controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. The Geological Society of America, v. 34, p.1073-1076.

FIELD M.E.; DUANE D.B. 1976. Post-Pleistocene history of the United States inner continental shelf: significance to origin of barrier islands. Geolog Soc Amer Bull, v 87, p. 691-702.

GALLOWAY W.E.; HOBDAV D.K. 1983. Terrigenous clastic depositional systems. Em: Springer, Berlin Heidelberg. New York.

HAYES M.O. 1994. The Georgia Bight barrier system. Em: Davis RA (ed) Geology of Holocene barrier island systems. Springer-Verlag, New York, p. 233-304.

HESP P.A.; SHORT A.D. 1999. Barrier morphodynamics. In: Short AD (ed) Handbook of beach and shoreface morphodynamics. John Wiley & Sons, Chichester, p. 307-333.

IPARDES, 1995. Diagnóstico ambiental da APA de Guaraqueçaba. Iparde, Curitiba.



JOL H.M.; BRISTOW C.S. 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In: BRISTOW C.S., JOL H.M. (Eds.), Ground Penetrating Radar in Sediments. Geological Society of London Special Publication, v. 211, p. 9-27.

KRAFT J.C.; CHAZASTOWSKI M.J. 1985. Coastal stratigraphic sequences. In: Davis RA (ed) Coastal sedimentary environments. Springer-Verlag, New York, p. 625-663.

LECKIE D.A.; WALKER R.G. 1982. Storm and tide dominated shorelines in Late Cretaceous Moosebar-Lower Gates interval outcrop equivalents old deep basin gas trap in western Canada. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, v. 66, p.138-157.

LESSA G.; ANGULO R.J.; GIANNINI P.C.F.; ARAÚJO A.D. 2000. Stratigraphy and Holocene evolution of a regressive barrier in south Brazil. Marine Geology, v. 165, p. 87-108.

MAACK R. 1947. Breves notícias sobre a geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina. Arquivos de Biologia e Tecnologia, v. 2, p. 66-154.

MAHIQUES, M.M.; MISHIMA, Y.; RODRIGUES, M. 1999. Characteristics of the sedimentary organic matter on the inner and middle continental shelf between Guanabara Bay and São Francisco do Sul, south-eastern Brazilian margin. Continental Shelf Research, v. 19, p. 775–798.

MARONE, E.; GUIMARÃES, M. R. F.; CAMARGO, R.; PRATA, V. P.; KLINGENFUSS, M. S. 1995. Caracterização física das condições oceanográficas, meteorológicas e costeiras das zonas estuarinas da Baía de Paranaguá. VI Congresso Latino Americano de Ciências do Mar. Mar del Plata, Argentina.

MARONE, E.; JAMIYANAA, D. 1997. Tidal characteristics and numerical model for the M<sub>2</sub> tide at the estuarine complex of the of Paranaguá, Paraná, Brazil. *Nerítica*, vol. 11, p. 95-107.

McCUBBIN, D. G. 1982. Barrier-Island and Strand Plain Facies. In: SCHOLLE, P. A. & SPEARING, D. *Sandstone Depositional Environments*. Published by The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 74101, U.S.A. p. 247 - 279.

MIALL, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits*. Berlin, Springer-Verlag.

MIHALY P.; ANGULO R. J. 2002. Dinâmica da desembocadura do corpo lagunar do Ararapira. *Revista Bras. de Geosci*, v. 32, n 02, p. 217-222.

MITCHUM R.M.; VAIL P.R.; SANGREE J.B. 1977. Stratigraphic interpretation of seismicreflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON C.E. (Ed.) *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memory, v. 16, p.117-123.

NEAL, J.; ABREU, V.S. 2009. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method. *Geology*, v. 37, p. 779-782.

NEAL, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth Science Review*, v. 66, p. 261-330.

NEAL, A.; PONTEE, N.I.; PYE, K.; RICHARDS, J. 2002. Internal structure of mixed-sand-and-gravel beach deposits revealed using ground-penetrating radar. *Sedimentology*, v. 49, p. 789-804.

NIELSEN, L.H.; JOHANNESSEN, P.N., 2008. Are Some Isolated Shelf Sandstone Ridges in the Cretaceous Western Interior Seaway Transgressed, Detached Spit Systems? In: HAMPSON, G.J.; STEEL, R.J.; BURGESS, P.M.;

DALRYMPLE, R.W. (Eds.), Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy: SEPM Special Publication, v. 90, p. 333-354.

NIELSEN, L.H.; JOHANNESSEN, P.N. 2009. Facies architecture and depositional processes of the Holocene–Recent accretionary forced regressive Skagen spit system, Denmark. *Sedimentology*, v. 56, p. 935-968.

OERTEL G.F. 1985. The barrier island system. *Marine Geology*, v. 63, p. 1-18.

OERTEL G.F.; KRAFT J.C.; KEARNEY M.S.; WOO H.J. 1992. A rational theory or barrier-lagoon development. In: FLETCHER C.H. III, WEHMILLER J.F. (ed) *Quaternary coasts of the United States: Marine and Lacustrine systems*. SEPM SP, v. 48, p. 78-87.

PEEL M. C.; FINLAYSON B. L.; MCMAHON T. A. 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 11, p. 1633-1644.

PETERSEN, D.; DEIGAARD, R.; FREDSOE, J., 2008. Modeling the morphology of sandy spits. *Coastal Engineering*, v. 55, p. 671-684.

PIANCA, C.; MAZZINI, P.L.F.; SIEGLE, E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58 , n 01, p. 53–70.

QUADROS, C.J.L. 2002. Variações morfológicas e volumétricas associadas à incidência de sistemas frontais em duas praias arenosas do litoral paranaense. 57 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

READING H.G.; COLLINSON J.D. 1996. Controls on the sedimentary rock record. Em: READING H.G. (ed.). Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy. Blackwell Science Ltd., 3 ed., p. 5-36.

RITCHIE W.; PENLAND S. 1990. Aeolian sand bodies of the south Louisiana coast. In: NORDSTROM K.F, PSUTY N.P, CARTER R.W.G (eds) Coastal dunes, form and process. John Wiley & Sons, London, p. 105-127.

ROSA M. L. C. C. 2012. Geomorfologia, Estratigrafia de Sequências e Potencial de Preservação dos Sistemas Laguna-Barreira do Quaternário Costeiro do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 246 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociência, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ROY P.S.; COWELL P.J.; FERLAND M.A.; THOM B.G. 1994. Wave-dominated coasts. In: Carter R.W.G. & Woodroffe C.D. (eds.), Coastal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics. Cambridge University press, Cambridge, p.121-186.

SANGREE J. B.; WIDMIER J.M. 1979. Interpretation of depositional facies from seismic data. Geophysics, v. 44, p. 131-160.

SAWAKUCHI A. O.; GIANNINI P.C.F. 2006. Complexidade em sistemas deposicionais. Revista Brasileira de Geociências, v. 36, n. 02, p. 347-358.

SCHWARTZ, M., 1982. The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments. In: Fairbridge, R. (Ed.), Encyclopedia of Earth Sciences Series, vol. XV. Hutchinson Ross Publishing Company, USA.

SOUZA M.C. 2005. Estratigrafia e evolução das barreiras holocênicas paranaenses, Sul do Brasil. 100 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

SOUZA M.C.; ANGULO R.J.; ASSINE M.L.; CASTRO D.L. 2012. Sequence of facies at a Holocene storm-dominated regressive barrier at Praia de Leste, southern Brazil. *Marine Geology*, v. 291, n. 294, p. 49-62.

SUGUIO K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FLEXOR, J.M.; AZEVEDO, A. E. G. 1985. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 15, p. 273-286.

TESSLER M.G.; MAHIQUES M.M. 1993. Utilization of coastal geomorphic features as indicators of longshore transport: Examples of the southern coastal region of the State of São Paulo, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 09, p. 823-830.

VEIGA F.A.; ANGULO R.J.; SÁ F.; ODRISKI L.L.R.; LAMOUR M.R.; DISARÓ S.T. 2006. Origin of mud deposits in a wave dominated shallow inner continental shelf of the State of Paraná coast, southern Brazil. *Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Itajaí. Journal of Coastal Research SI* v. 39, p. 262–265.

WALKER R.G. 1992. Facies Models and modern stratigraphic concepts. In: WALKER R.G.; JAMES N.P. (eds) *Facies models: response to sea level change*. Geological Association of Canada.